



Глава

9

ВВЕДЕНИЕ 777

1. СОРУДАЛЕНИЕ, ПРОЦЕЖИВАНИЕ,
РАЗМЕЛЬЧЕНИЕ 778
2. УДАЛЕНИЕ ПЕСКА 791
3. ОБРАБОТКА ОТХОДОВ ОТ ЧИСТКИ СЕТЕЙ.
ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ЛИНИЯ ARENIS 800
4. ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЖИРОВ И МАСЕЛ 803
5. СПЕЦИФИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ЖИРОВ 811

Предварительная обработка

Введение

В городские коллекторы сточных вод, особенно в случае общесплавных сетей канализации, попадают самые разнообразные материалы, различающиеся по своей природе, форме и состоянию

Предварительная обработка воды необходима для защиты водозаборов, насосных станций и трубопроводов от забивания, для предотвращения абразивного действия примесей на оборудование, используемое для обработки воды, а также для удаления всех загрязнений, способных помешать любой последующей обработке

К предварительной обработке относят следующие процессы (в зависимости от мощности очистных сооружений и качества поступающей исходной воды предварительная обработка может состоять из одной или нескольких операций)

- грубое фильтрование на решетках сороудаления,
- процеживание,
- размельчение задержанных грубых загрязнений,
- удаление песка,
- извлечение жиров (часто в сочетании с удалением песка),
- удаление масел и нефтепродуктов,
- обработка побочных продуктов' песка и жиров;
- совместная обработка отходов от чистки канализационных сетей и песка очистных сооружений

■ Забивание решеток

Уровень допустимого забивания (процентная доля смоченного свободного сечения) зависит от качества воды и от системы удаления с решетки задержанных ею загрязнений.

Для автоматизированных решеток и сит оно составляет.

- прозор 10 мм — около 25 %,
- прозор от 5 до 10 мм — около 50 %,
- прозор менее 5 мм — около 75 %

Для решеток, очищаемых вручную, площадь погружаемой части решетки должна рассчитываться с гораздо большим запасом, чтобы предотвратить излишнюю частоту операций чистки. Примерное падение напора на них составляет 10 см

1.1.1.2. Автоматическое управление

Работа устройства чистки решетки обычно осуществляется в периодическом режиме. Управление этим устройством производится циклической системой с регулированием частоты (от 1 мин до 1 ч) и длительности работы (от 1 до 15 мин), а также датчиком падения напора (входным или дифференциальным), либо индикатором уровня безопасности, запускающим непрерывный режим работы устройства чистки.

В случае размещения решетки после насосной станции управление решеткой может быть увязано с запуском насосов

1.1.1.3. Защита

Автоматизированные решетки оснащены ограничителями усилия, позволяющими предотвратить разрушение конструкционного материала в случаях значительного забивания, которое может приводить к возникновению избыточной нагрузки или блокированию потока

Автоматизированные решетки с возвратно-поступательной чисткой имеют устройство, обеспечивающее автоматический останов скребка в точке, находящейся вне поля решетки, что предотвращает опасность заклинивания или возникновения аномального крутящего момента при повторном запуске

1.1.2. Различные типы решеток

1.1.2.1. Решетки с ручной чисткой

Решетки с ручной чисткой сделаны из прямых прутьев круглого или прямоугольного сечения. Их можно устанавливать вертикально или под наклоном (под углом 60–80° к горизонтали) для облегчения процедуры удаления задержанных отходов. Они могут быть подвижными (на направляющих) или поворотными, что позволяет очищать и канал после решетки (если этот канал накрыт). На станциях подъема сточных вод вместо решеток часто устанавливают не требующие прямого доступа перфорированные подъемные ковши. Уход за решетками и их чистка связаны со значительными неудобствами. По этой причине такие решетки обычно работают в периодическом режиме (перепускные линии)

1.1.2.2. Решетки с автоматической чисткой

■ Решетки с чисткой входной поверхности

Поле решетки обычно формируется прутьями прямоугольного или трапециевидного сечения (снижающего опасность заклинивания твердыми материалами), име-

ющими острыми или скругленными углами. Некоторые такие устройства подходят для тонкого сороудаления (вплоть до процеживания) при условии адаптирования поля решетки (например, типа решетки Джонсона с прозором от 0,5 до нескольких миллиметров) или при применении перфорированного листа. Удаление задержанного мусора всегда производится с выходной стороны решеток.

Существует четыре основных типа подобных решеток.

► **ИЗОГНУТЫЕ РЕШЕТКИ ТИПА DC (фото 1)**

Преимущество изогнутых решеток типа DC с прозором 10–25 мм состоит в том, что они имеют высокое значение полезного сечения прохода и простую механическую конструкцию.

Чистка поля решетки производится четырьмя гребенчатыми скребками, установленными на конце вала, вращающегося вокруг горизонтальной оси, для предотвращения заклинивания решетки полезно устанавливать перед ней специальные камнеловушки.



Фото 1. Изогнутая решетка типа DC



Фото 4. Пост сороудаления с чистой выходной плоскости решетки

ленные на осях, позволяют формировать непрерывную цепь. Извлеченный мусор поднимается и выгружается в верхней задней части решетки.

Зубья цепи образованы траверсой с заостренным концом. Элементы решетки самоочищаются при входе острых концов в пространство между траверсами, процесс самоочищения завершается с помощью вращающейся щетки.

▶ ВРАЩАЮЩИЕСЯ РЕШЕТКИ СТУПЕНЧАТОГО ТИПА

Поле решетки (прозор от 3 до 15 мм) образовано двумя группами параллельных пластин, причем каждая группа пластин имеет форму ступеней лестницы. Одна из этих групп неподвижна, а другая может перемещаться.

Система шарнирных траверс передает вращательное движение подвижным пластинам, что позволяет перемещать извлеченный мусор со ступеньки на ступеньку вплоть до точки его сброса.

■ Решетки с чистой выходной плоскости

Некоторые решетки оснащены высокопроизводительной системой чистки с кольцевым цепным приводом, устанавливаемым на выходной плоскости решетки. При использовании таких систем чистки существует определенная опасность попадания извлеченного мусора в очищенную воду, прошедшую сквозь решетку. Тем не менее решетки предварительного сороудаления с чистой выходной плоскости могут быть рекомендованы для обработки сильно загрязненных вод (фото 4).

1.2. Сита

1.2.1. Условия применения

Помимо механических решеток с узкими щелями шириной 3 или 6 мм, необходимых для некоторых линий очистки ГСВ, в некоторых случаях полезно также исполь-

зовать сита с меньшими отверстиями, это имеет место, например, на небольших очистных сооружениях для упрощения их эксплуатации или на многочисленных очистных установках предприятий аграрно-пищевой промышленности, где процеживание обеспечивает удаление значительной части загрязнений, находящихся во взвешенном состоянии, и дает возможность последующей утилизации отделенных отходов

Рабочими элементами этих сит являются перфорированные листы или сетки типа решетки Джонсона (более употребительны) Размер отверстий может составлять от 0,15 до 2 мм Различают

- вращающиеся барабанные сетки, производительность которых может достигать 1500 м³/ч;
 - вертикально установленные вогнутые сетки, оснащенные системой самоочистки (рис. 3); производительность таких сеток не превышает 100–200 м³/ч
- Поскольку вода подается в виде вертикальной водяной завесы, задерживаемые частицы гидравлически увлекаются в нижний приемник

1.2.2. Различные типы сит

1.2.2.1. Сита для сточных вод

В диапазоне сит с отверстиями 0,15–2,5 мм используются два основных типа процеживающих устройств.

■ Барабаны и вращающиеся сетки

Загрязненная вода подается в барабан снаружи или изнутри

Вода проходит через сетку, тогда как твердые примеси задерживаются на ней, затем увлекаются барабаном при его вращении и удаляются

В зависимости от типа подачи воды (внутренняя или внешняя) задержанные твердые продукты удаляют скребками либо используют действие силы тяжести

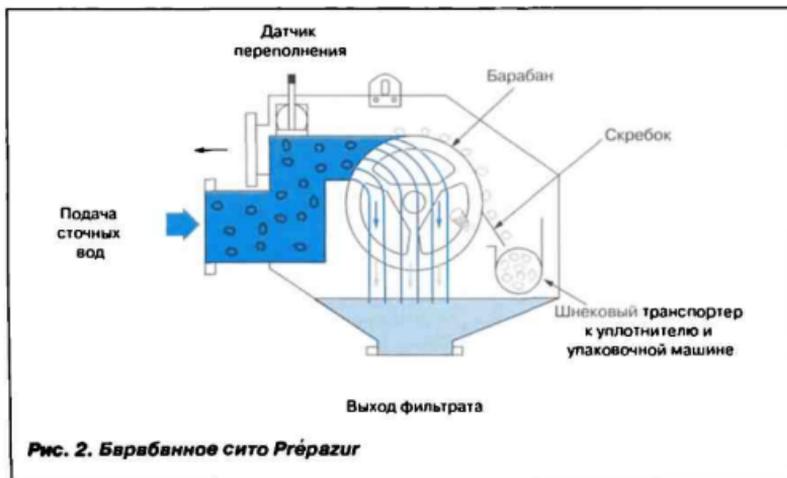
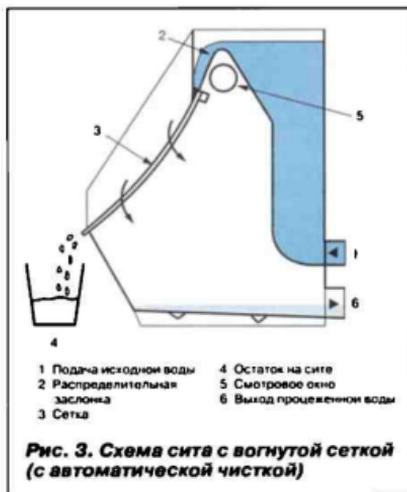


Рис. 2. Барабанное сито Prépazur

К этому классу принадлежит аппарат барабанного типа **Préazur** (рис. 2) с отверстиями 0,6 и 1,5 мм, предназначенный для предварительной обработки сточных вод на мелких и средних очистных сооружениях. Этот аппарат выполняет три функции: разделение жидкой и твердой фаз, уплотнение (шнековый уплотнитель) задержанных продуктов и упаковка уплотненных отходов (машина для упаковки в пленку). Общий кожух, накрывающий компактный комплекс оборудования, значительно снижает проблему возникновения и распространения запаха.

■ Изогнутое сито (вогнутая сетка) (рис. 3)

Изогнутое сито представляет собой вогнутую сетку, основной характеристикой которой являются углы наклона в различных зонах сетки, позволяющих извлекать наибольшую часть загрязнений (в промывающей зоне), удерживать и сцеживать загрязнения.



Существует «виброразнообразие» сит такого типа. Они больше подходят для удаления жироподобных и клейких продуктов, а также для обработки сильно загрязненных вод.

1.2.2.2. Сита для поверхностных вод

■ Макропроцеживание

Фильтрующим элементом при макропроцеживании служат перфорированные листы, но чаще применяется сетка с перекрещивающимися ячейками, изготовленная из нержавеющей стали или из синтетической ткани с проходами диаметром от 0,15 до 2 мм.

Сита конструктивно выполнены в форме барабанов диаметром от 1,5 до 6 м или полос шириной от 1 до 3 м, высота которых (от 3 до 15 м) наилучшим образом соответствует рекам, имеющим переменный уровень воды (рис. 4).

■ Микропроцеживание

Фильтрующие сетки из синтетической ткани имеют проходы размером от 30–40 до 150 мкм. Эти сетки устанавливают на барабанах. Оборудование для промывки должно обеспечивать более интенсивное разбрызгивание промываемой воды с тем, чтобы струйки воды были способны «пробивать» ткань насквозь, выталкивая мелкие частицы песка и грязи, застрявшие в ячейках сетки.

При обработке промышленных вод в целях защиты особо чувствительных аппаратов и систем (например, разбрызгивателей, систем ультра- или микрофльтрации, систем промывки тканевых фильтров и т. п.) можно рекомендовать установку систем макро- или микропроцеживания под давлением, часто называемых системами механического фильтрования.

Фильтры механического фильтрования (рис. 5) оснащены системой полуперывной промывки, обеспечивающей удаление отходов путем противоточной пода-

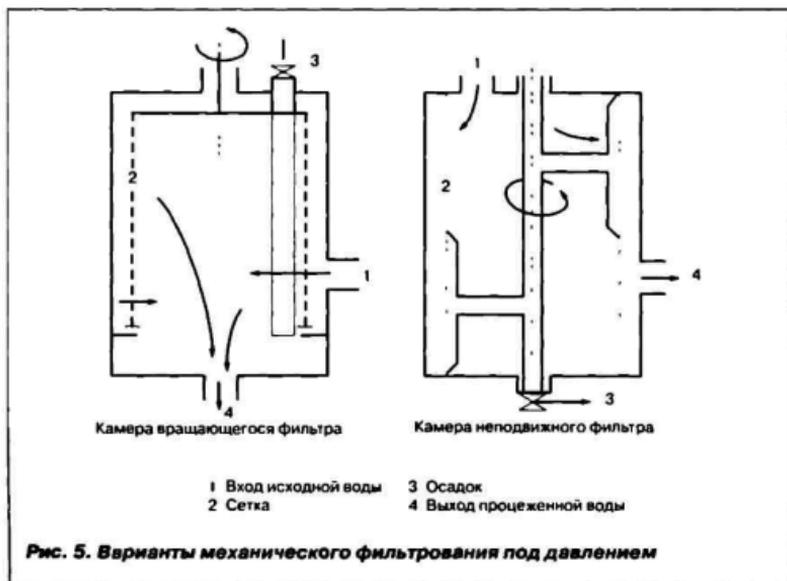
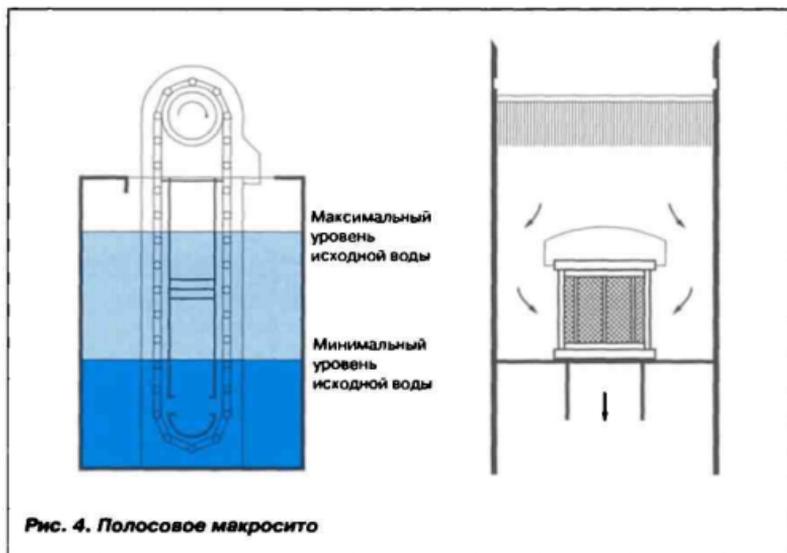


Таблица 1
Сравнительные характеристики некоторых решеток и сит

	Тип решетки или сита	Принцип чистки	Глубина канала, м	Ширина канала, м	Прозор решетки или размер отверстия, мм
Предварительное сороудаление	Прямая тросовая решетка	Возвратно-поступательный	2-10	-	40-100
Промежуточное сороудаление	Изогнутая решетка, тип DC	Непрерывный	0,75-2	0,5-1,6	10-20
	Решетка с кольцевым цапным приводом	Непрерывный	-	-	-
	Прямая тросовая решетка	Возвратно-поступательный	2-10	0,1-2,6	10-20
	Решетка с зубчато-реечным приводом	Возвратно-поступательный	1-18	0,5-9	10-100
	Решетка с грейфером	Возвратно-поступательный	2,5-10	1,5-10	10-20
Тонкое сороудаление	Прямая решетка тонкого сороудаления типа GFD	Непрерывный	2-10	1-2,6	10
	Ступенчатая решетка	Непрерывный	-	-	3-10
	Решетка с зубьями	Непрерывный	-	-	3-10
Процеживание	Сито типа вращающегося барабана	Непрерывный	-	-	0,15-2,5
	Изогнутая сетка	Вогнутая сетка	-	-	0,15-2,5

чи атмосферного давления на один из секторов фильтра. Давление промывки должно соответствовать механическому сопротивлению сетки.

На практике для предотвращения необратимого забивания фильтра и уменьшения расхода промывной воды часто приходится ограничивать минимальный размер проходов сетки при напорном процеживании.

- до 100–150 мкм — для вод, загрязненных органическими веществами и растительными остатками,
- до 40–50 мкм — для вод, содержащих только зернистые неорганические вещества.

Наиболее пагубным для микропроцеживания является присутствие волокон, поскольку они сцепляются с материалом сетки и запутываются в ней. Известны два конструктивных варианта сит (см. рис. 5). Единичная производительность таких аппаратов снижается с повышением тонкости процеживания. Для сеток с отверстиями свыше 250 мкм производительность может достигать 5000 м³/ч, а для

микропроцеживания — 500 м³/ч. В тех же условиях потери воды на промывку меняются от 2 до 8 %.

1.3. Основные принципы выбора

Выбор типа решетки или сита зависит от предполагаемого места их размещения и от требуемого качества сороудаления. В табл. 1 приводятся основные характеристики рассмотренных типов решеток и сеток.

1.4. Измельчение

При измельчении, преимущественно касающемся ПСВ, размельчают твердые, переносимые водой вещества, чтобы они могли продвигаться к последующим стадиям обработки. Цель состоит в том, чтобы устранить все затруднения, связанные с отделением и вывозом отходов, собирающихся на решетках, ситах и сетках, и обеспечить некоторое увеличение объема газов, образующихся при их сбраживании. Однако при применении измельчения на практике обнаруживается целый ряд недостатков, в первую очередь опасность образования комков измельченных волокон, смешанных с жиром (забивание насосов и трубопроводов и т. п.), а также необходимость регулярного вмешательства в целях технического обслуживания этого достаточно сложного оборудования.

Таблица 2
Общие характеристики измельчителей

Тип измельчителя	Производительность, м ³ /ч	Мощность электродвигателя, кВт
Измельчитель на свободном потоке воды	5000–8000	0,25–4,0
Измельчитель в технологической линии	50–300	7,5–20

По этим причинам в настоящее время проводить измельчение рекомендуется лишь в весьма редких случаях, но его иногда применяют в сочетании с тонким процеживанием осадков, при этом используют напорные измельчители, обеспечивающие требуемую тонкость измельчения.

1.5. Удаление и обработка отходов, собираемых с решеток

Отходы, накапливающиеся на решетках, часто приравнивают к бытовым и направляют на захоронения или на сжигание.

Различные проблемы, возникающие в связи с их транспортировкой, все чаще приводят к необходимости организации их обработки путем обезвоживания и уплотнения.



Фото 5. Вагонетка компании «SITA» со встроенным механизмом уплотнения



Фото 6. Пресс для отходов

- обезвоживание (и транспортировка) на вагонетках со встроенным механизмом уплотнения (фото 5): содержание остаточной воды от 75 до 80 %, кажущаяся плотность уплотненных в вагонетке отходов примерно 0,75–0,8 по отношению к плотности воды.
- уплотнение с помощью механического (см. фото 5) или гидравлического (фото 6) пресса. спрессованный продукт может иметь содержание воды 55–65 % при кажущейся плотности 0,6–0,65 по отношению к плотности воды.

2. Удаление песка

2.1. Общие положения

2.1.1. Цель обработки

Цель удаления песка состоит в извлечении из исходной воды гравия, песка, а также волокон и более или менее мелких минеральных частиц с тем, чтобы предотвратить формирование отложений в каналах и трубопроводах и защитить насосы и другое оборудование от абразивного воздействия

Для определения степени задерживания подобных загрязнений песколовкой конкретной геометрии можно исходить из данных, приведенных в табл. 3 (рассчитаны для свободной седиментации частиц песка, имеющего плотность 2,65 кг/дм³)

- На практике при проектировании песколовков возникают две основные проблемы
- песок приносится водой главным образом в периоды пиковых расходов (в результате самоочистки сточных коллекторов), когда скорость горизонтального потока воды наиболее высока и, следовательно, увеличивается количество песка, переходящего в суспензию;
 - при обработке сточных вод цель операции заключается в извлечении из воды максимального количества минеральных загрязнений с минимальным содержа-

Таблица 3

Скорость оседания частиц песка на различных горизонтальных потоках жидкости

D , мм	0,05	0,10	0,20	0,30	0,40	0,50	1,0	2,0	3,0	5,0	10
V_c , см/с	0,2	0,7	2,3	4,0	5,6	7,2	15	27	35	47	74
V_k , см/с	0	0,5	1,7	3,0	4,0	5,0	11	21	26	33	51
V_c , см/с	0	0	1,6	3,0	4,5	6,0	13	25	33	45	65
V_l , см/с	15	20	27	32	38	42	60	83	100	130	190

Примечание D — диаметр частицы песка, V_c — скорость седиментации при скорости горизонтального течения жидкости, равной нулю, V_k — скорость седиментации при скорости горизонтального течения жидкости, равной V_l ; V_c — скорость седиментации при скорости горизонтального течения жидкости равной 0,30 м/с, V_l — критическая скорость уноса осевшей частицы горизонтальным потоком

нием органических веществ (ОВ), создающих целый ряд неудобств при хранении и вывозе задержанных отходов

Для отделения органических веществ от минеральных следует обеспечить должный уровень турбулентности, откуда следует необходимость организации поперечного перемешивания, для чего обычно применяют сжатый воздух

2.1.2. Условя применения

При удалении песка обычно имеют дело с частицами размером не менее 200 или 300 мкм, более мелкие частицы, как правило, удаляются на стадиях грязеотделения или отстаивания (см гл 10)

С теоретической точки зрения процесс удаления песка аналогичен процессу отстаивания зернистых частиц (см гл 3, п 3.1)

2.1.3. Количество песка

Количество песка в сточных водах меняется в очень широких пределах. Оно, в частности, зависит:

- от геологических характеристик региона;
- от состояния и протяженности канализационной сети;
- от типа сети (раздельная, общесплавная, смешанная), а также от ее технического обслуживания;
- от частоты дождливых периодов.

Количество извлекаемого песка обычно не превышает 15 л в год на одного жителя

Необходимо подчеркнуть трудности, возникающие при оценке количества песка, поступающего на очистные сооружения, или при определении эффективности (порога задерживания) песколовки:

- основная из них заключается в отборе проб. Действительно, для сохранения суспензии, образованной частицами песка размерами свыше 0,3–0,4 мм, требуется создание значительной турбулентности;
- понятие «песок» используют для обозначения всех зернистых частиц в материалах, задержанных комплектом сит и полученных после прокаливания пробы, вследствие чего в них входит не только собственно песок, но также частицы других минеральных веществ, часто обладающих большей или меньшей пористостью (осколки стекла, бетона, фарфора, фаянса и т. д.). Вследствие этого при определении эффективности удаления песка следует уточнять, что речь идет только о материалах, имеющих плотность, например, более 2,5 кг/дм³, и, следовательно, предусматривать классификацию задержанных частиц путем их отстаивания в плотной среде (напомним, в табл 3, используемой для расчета песколовок, плотность принята равной 2,65).

2.1.4. Обработка песка

Песок обычно подвергают обработке в целях снижения содержания в нем ОВ, поэтому задержанные отходы на выходе песколовки направляют на специальную обработку с использованием следующего оборудования

- гидроциклон,
- классификатор,
- устройство для промывки песка.

При наличии установки типа **Arenis** компании «Дегремон» (см п 3) песок направляют непосредственно на нее

2.2. Область применения

2.2.1. Удаление песка из поверхностных вод

Воздухозбор должен быть спроектирован таким образом, чтобы максимально уменьшить количество песка, увлекаемого забираемой водой. Если же местные условия этого не позволяют, следует установить песколовку, что выгоднее, чем извлекать песок на других сооружениях, если сооружения обработки включают стадию процеживания (например, сито с отверстием 1–2 мм), удаление песка необходимо производить до процеживания, чтобы предотвратить повреждение сита.

Песколовка обычно имеет вид крупного канала (коридора) прямоугольной формы. Поперечное сечение песколовки устанавливают в зависимости от желаемой скорости горизонтального течения: если предполагается осуществлять гидравлический отвод песка, то эта скорость должна несколько превосходить критическую скорость уноса V_i осевших частиц горизонтальным потоком (см. табл. 3), если же удаление будет производиться с помощью донных скребков, то она должна быть ниже критической.

Горизонтальную площадь рассчитывают делением максимального пропускаемого расхода на скорость седиментации V_s задерживаемых частиц наименьшего размера, скорректированную в зависимости от выбранной скорости горизонтального течения.

Песок можно также отделять в циклонах (гидроциклон с нагнетанием от насосов подкачки) (см. п. 2.4).

2.2.2. Удаление песка из городских сточных вод

В самотечных общесплавных сетях канализации для защиты оборудования рекомендуется устройство специальных ям, в которых задерживается крупный песок, камни, куски стекла и металлические предметы.

В собственно песколовке доля ОВ, оседающих одновременно с песком, может быть минимизирована, если вблизи дна сооружения поддерживается скорость порядка 0,3 м/с (так называемая скорость смыва). В действительности же процентное соотношение органических и минеральных веществ при этой скорости еще достаточно высоко, около 50 %.

Улучшить разделение можно либо путем промывки извлеченного песка (содержание ОВ в промытом песке снижается до уровня менее 30 %), либо в специализированных реакторах, после которых это содержание составляет менее 5 и даже 3 % (см. п. 3).

Природа задерживаемых загрязнений обуславливает необходимость применения специализированного оборудования, ограничивающего опасность абразивного воздействия и забивания (вихревой насос — аппарат эмульгирования воздухом).

На практике применяется следующее оборудование (в порядке возрастания значения и эффективности):

- песколовка с простым каналом, в которой скорость течения меняется с расходом. Область применения этих сооружений ограничивается небольшими простыми очистными сооружениями. Песок извлекают вручную из продольного лотка, имеющего накопительную емкость на 4–5 сут;
- песколовка с усовершенствованным каналом (выходной водослив, работающий по линейной зависимости, высота воды на водосливе пропорциональна расходу) позволяет поддерживать постоянную скорость истечения около 0,3 м/с. Время пребывания составляет от 1,5 до 2 мин,

- радиальная песколовка с механическим извлечением песка и гидравлическим удалением плавающих и вспененных материалов (см п 2 3.2) Время пребывания около 2–3 мин.
 - прямоугольная аэрируемая песколовка с механическим извлечением песка и гидравлическим удалением плавающих и вспененных материалов (см п 2 3.3) Время пребывания около 2–5 мин
- Сооружения двух последних типов хорошо подходят для работы в **комбинированном режиме** песколовки-жировловки (см п 4 2), они же наиболее часто и применяются

2.2.3. Удаление песка из промышленных сточных вод

При очистке ПСВ необходимость удаления песка возникает значительно реже, исключением являются очистные сооружения, принимающие значительные объемы ливневых вод. В некоторых случаях (особенно при обработке стоков предприятий агропромышленного комплекса) можно использовать аэрируемые песколовки, применяемые для обработки ГСВ.

При обработке некоторых сточных вод предприятий металлургической и металлообрабатывающей промышленности основная цель стадии удаления песка состоит в извлечении очень тяжелых частиц оксида железа и гранулированного шлака или окалины, кажущаяся плотность которых может варьировать от 2,5 до 4 по отношению к плотности воды. Эти частицы, исходное содержание которых может составлять от 0,2 г/л до нескольких граммов на литр, обладают абразивными свойствами и склонны к быстрому оседанию, что требует оснащения песколовков специальным оборудованием для их извлечения.

2.2.4. Предварительная обработка осадка

Предварительная обработка осадка главным образом предусматривается для защиты оборудования, чувствительного к присутствию различного вида волокон, а также (в более редких случаях) различных твердых материалов (камней, песка, частиц металла и т. п.)

Большинство аппаратов, предназначенных для обработки осадка (например, ментанки, ленточные фильтры и т. п.), имеют особую прочность и допускают попадание в них довольно крупных предметов, однако некоторые из них гораздо более чувствительны к присутствию таких отходов (центрифуги, оборудование для термической обработки и т. п.)

Для предварительной обработки осадков применяют следующие процессы

- тонкое сороудаление на свободном потоке воды (без давления),
- процеживание с помощью шнекового пресса (типа «Strainpress»),
- измельчение, которое в этом случае входит в технологическую линию (редко используется),
- обработка в циклонах

В результате перечисленных процессов также образуются отходы, которые сходны с осадком на сетке или решетке, формирующимся при сороудалении.

2.3. Сооружения

2.3.1. Предварительная песколовка или яма для крупных предметов

Установку предварительной песколовки следует предусматривать при следующих условиях

- общесплавная или псевдораздельная сеть,

- отсутствие камер-песколовок на отводном канале или отсутствие ухода за такими камерами,
- незначительный уклон отводного канала (ограниченная самоочистка при больших поступлениях ливневой воды)

■ Расчет ямы для крупных предметов

После изучения процесса накопления гравия, керамики и других крупных предметов на нескольких очистных сооружениях была предложена следующая формула расчета минимального объема такой ямы

$$V > C_b \cdot Q_p \cdot h \cdot n,$$

где

V — объем, м³,

C_b — расчетная нагрузка песка и гравия, м³/м² исходной воды,

Q_p — расход ливневых вод, м³/ч,

h — продолжительность дождя, ч,

n — количество дождливых периодов (ливней), связанных с заполнением ямы

Значение C_b принимают равным $50 \cdot 10^{-6}$ м³/м²

Поверхность ямы должна обеспечивать поверхностную нагрузку порядка $800 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Яма, имеющая поверхность большей величины, превращается в частичную песколовку

■ Чистка ям

Для извлечения накапливаемых в яме крупнозернистого песка и гравия существует два технических решения — установка над ямой portalной опоры или балочной фермы с грейфером или извлечение отложений с помощью отсасывающего устройства на автомобильной платформе

В первом случае извлечение отходов можно производить из ямы, заполненной водой. Во втором случае предпочтительно иметь две ямы, которые можно изолировать друг от друга

■ Вентиляция ям

При оборудовании ям необходимо учитывать возможность появления запахов и выделения сероводорода, поскольку отходы, которыми они будут заполняться, содержат летучие материалы, способные к сбраживанию. Вследствие этого необходимо предусматривать надлежащую вентиляцию с установкой датчика H_2S .

2.3.2. Радиальные песколовки

Радиальные песколовки имеют цилиндроконическую конфигурацию, диаметр от 3 до 8 м и высоту уровня жидкости от 3 до 5 м

Песок оседает на более или менее наклонное днище и естественным путем перемещается вниз, попадая в центральный приемный бункер, где накапливается и от куда затем выгружается. Скорость смыва днища поддерживается относительно постоянной, превышающей 0,3 м/с. Это достигается тремя способами вращения массы жидкости, определяющими тип установки

- под действием вихревого эффекта, возникающего в результате тангенциальной подачи воды,
- с помощью механической лопастной мешалки, установленной на вертикальной оси, которая независимо от расхода позволяет поддерживать постоянную

удельную мощность перемешивания на уровне $10\text{--}20 \text{ Вт/м}^3$, т.е. работать при постоянном уровне жидкости.

— подачи воздуха через специальные диффузоры в погруженный в воду центральный цилиндрический отражатель (жидкость вращается в вертикальной плоскости) Этот вариант также дает возможность работать при практически постоянном уровне жидкости

Отделенный песок извлекают с помощью насоса или эрлифта и направляют в камеру гравитационного сцеживания или в систему механической рекуперации

2.3.3. Азрируемые прямоугольные песколовки

Азрируемые прямоугольные песколовки, ширина которых может доходить до 4 м (простое сооружение) или до 8 м (сдвоенное сооружение), имеют глубину около 4 м при максимальной длине около 30 м. Они позволяют обрабатывать большие расходы воды (до $15\,000 \text{ м}^3/\text{ч}$ на сдвоенном сооружении). Форма дна определяется системой удаления извлекаемого песка

Вода подается через отверстие, расположенное ниже уровня воды в одном конце песколовки, и отбирается с противоположной стороны, часто вывод осуществляется через водослив, с помощью которого можно регулировать уровень воды

Песколовка с продольным потоком воды оснащена на всей протяженности системой продувки воздуха с помощью воздушных диффузоров, например типа **Vibrair**, которые обеспечивают удельную мощность азрирования порядка $15\text{--}30 \text{ Вт/м}^3$. Уровень жидкости может поддерживаться практически постоянным. Вводимый воздух сообщает жидкости вращательное поперечное движение и способствует, благодаря эффекту турбулентности, отделению ОВ, приставших к частицам песка, а также позволяет частично удалять плавающие вещества (в том числе застывшие жиры)

Извлечение песка производится автоматически с применением различных технических средств:

- набора эрлифтов периодического действия (сбор продукта в нижнем бункере),



Фото 7. Азрируемая прямоугольная песколовка

- мостовых скребков (сдвигающих донные отложения в приемную яму с последующим извлечением насосом или неподвижным эрлифтом),
- отсасывающего насоса или эрлифта, установленного на подвижном мостике с переливом суспензии песка в боковой отводящий лоток (фото 7)

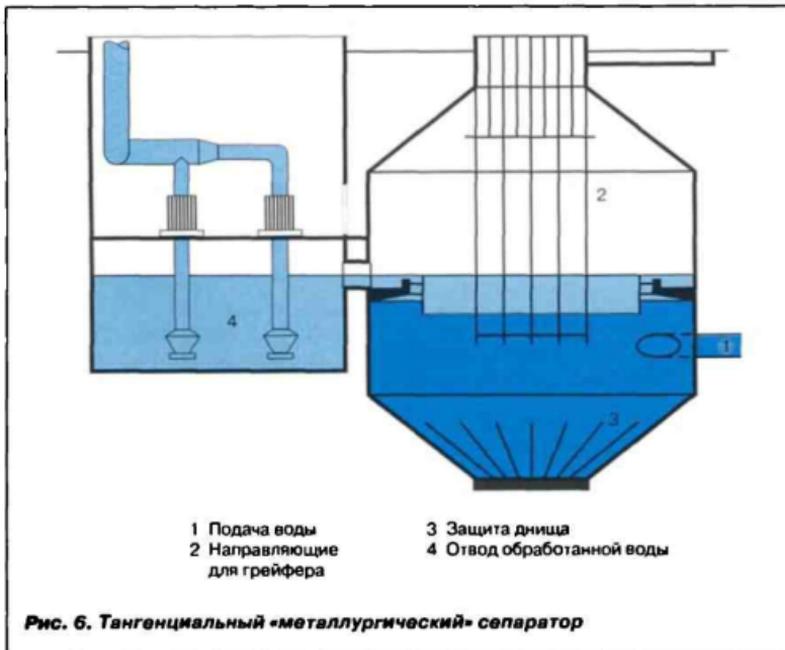
2.3.4. «Металлургические» песколовки

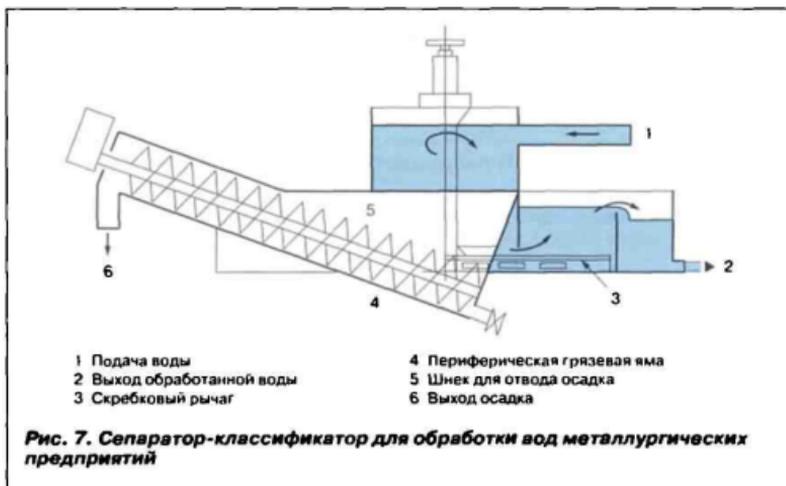
В зависимости от расхода подлежащей обработке воды на предприятиях металлургической промышленности можно применять один из двух типов установок удаления песка

■ Тангенциальные сепараторы

Тангенциальные сепараторы (рис 6) часто неправильно называют гидроциклонами, поскольку создаваемая на них центробежная энергия невелика. Подвод обрабатываемых сточных вод может располагаться на глубине до 10 м (прокатные и полосовые станы, установки непрерывного литья). Эти установки цилиндрикоконической конфигурации выполняют двойную функцию

- отделение зернистых частиц в результате вертикального отстаивания;
- отделение поступающих с водой масел благодаря размещению отвода очищенной воды под сифонной стенкой





Удаление отделенных загрязнений осуществляется с помощью грейфера.

Подобные установки, сооружаемые компанией «Дегремон», имеют диаметр от 4 до 32 м. В технологической линии они размещаются перед отстойниками или фильтрами и способны задерживать частицы размером от 120 мкм и выше (см. также гл. 25, п. 8.1.4).

■ Сепаратор-классификатор

Сепараторы-классификаторы, используемые в основном в сталелитейной промышленности, имеют единственное назначение, состоящее в удалении зернистых частиц размером свыше 200–250 мкм. Их устанавливают перед отстойниками-сгустителями для защиты грязевых насосов и оборудования для обезвоживания.

Предлагаемые компанией «Дегремон» установки диаметром от 5 до 12 м имеют цилиндрическую зону очень быстрого отстаивания в относительно тонком слое воды. Обработываемая вода поступает по наземным трубопроводам. Скребок установки, расположенный на диаметре и имеющий центральный привод, сдвигает осадки во внешнюю яму-приемник, откуда они извлекаются с помощью шнека или возвратно-поступательного скребка (рис. 7).

2.4. Гидроциклон

Гидроциклон осуществляет отделение содержащихся в воде твердых частиц методом центробежной гидравлической классификации. Он имеет цилиндрикоконический корпус, тангенциальная подача обрабатываемой воды обеспечивает ее вращение внутри корпуса (рис. 8). Слив задержанных в гидроциклоне загрязнений осуществляется через осевой патрубок — концентрат осадка выходит из заостренной части аппарата.

Центробежное ускорение в аппаратах самых малых габаритов может превышать 600 g, а давление подачи воды может изменяться в пределах от 0,5 до 2 бар. Харак-

теристика разделения d_{50} , выражаемая обычно в микрометрах и неточно называемая способностью к задерживанию, соответствует диаметру частиц, для которых обеспечивается 50%-е отделение

Аппарат характеризуется диаметром корпуса D , величиной отношения длины L к диаметру D , диаметром e входного отверстия, диаметром s выходного отверстия и углом α при вершине конуса

Для описания циклона предлагались различные выражения. Так, например, согласно Рьетема (Rietema), характеристическое число, зависящее только от геометрических размеров аппарата, имеет вид

$$Cy_{50} = \frac{d_{50}^2 \rho \Delta\rho L \rho}{\mu \rho q} = \text{const.}$$

$$\text{т.е.} \quad d_{50} = k \sqrt[3]{\frac{\mu \rho}{L \Delta\rho \rho}}$$

где

ρ — плотность воды;

$\Delta\rho$ — разность плотностей твердых частиц и воды;

$\Delta\rho$ — дифференциальное давление в аппарате;

μ — динамическая вязкость;

q — производительность аппарата

Изменение дифференциального давления $\Delta\rho$ в зависимости от поперечного расхода определяют экспериментально.

На практике применяют гидроциклоны, принадлежащие к одному из следующих двух семейств

■ Простые однотрубные гидроциклоны

Простые однотрубные гидроциклоны, диаметр которых составляет 150–800 мм, предназначены для обработки расходов от 20 до 250 м³/ч, значение d_{50} для песка составляет от 50 до 80 мкм. Они защищены от абразивного воздействия и могут применяться для обработки низкоконцентрированных суспензий осадка — в противном случае способность к задерживанию быстро возрастает.

■ Многотрубные циклоны

Для удаления песка из слабо загрязненной воды при ее больших расходах можно применять напорные циклоны очень малого диаметра, которые часто устанавливают параллельно внутри одного корпуса. Эти аппараты обеспечивают возможность достижения более низких значений d_{50} (10 мкм). Они имеют диаметр в несколько сантиметров и изготавливаются из антиабразивного пластика. Потеря напора в них

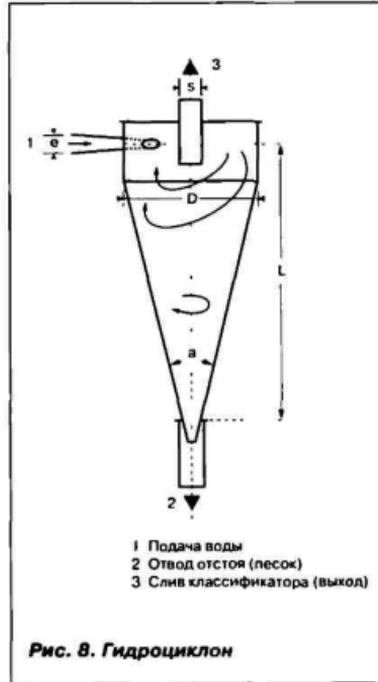


Рис. 8. Гидроциклон

составляет от 1 до 2 бар. Подачу воды осуществляют после надлежащей обработки на сите

3. Обработка отходов от чистки сетей. Технологическая линия Arenis

3.1. Природа веществ, извлекаемых при чистке сетей канализации

В процессе транспортировки по канализационным сетям городские сточные и ливневые воды теряют в результате седиментации часть переносимых ими загрязнений, которые откладываются в виде осадков. Эти осадки, обычно называемые «пески от чистки», «осадки от чистки» или «продукты от чистки», состоят из **веществ, сходных с бытовыми отходами, и разнородной смеси органических материалов с песком**, причем в зависимости от типа канализации соотношение всех этих компонентов может меняться в очень широких пределах.

Оседающий в сетях песок, средняя крупность которого превышает размеры частиц песка, задерживаемого песколловками очистных сооружений, также загрязнен органическими и минеральными примесями, однако он содержит меньше ОВ, чем песок, отделяемый на стадии предварительной обработки (20 и 60 % соответственно).

Минеральный компонент, т. е. песок, образуется при разрушении дорожного покрытия и тротуаров, уносится с различных городских стройплощадок, остается после использования на дорогах и тротуарах в зимний период, является продуктом эрозии почвы и др.

Таким образом, это отходы, которые не могут быть приравнены ни к осадкам очистных сооружений, ни даже к песку, задерживаемому в процессе предварительной обработки сточных вод.

Количество песка, извлекаемого из перечисленных выше источников, составляет в среднем 10 л на одного жителя в год (или около 18 кг на одного жителя в год).

Существует три основных способа чистки сетей: отсасывание через канализационные колодцы с помощью гидроочистителей, прочистка и отсасывание из крупных коллекторов и выемка попатами из камер пескоулавливания.

3.2. Регламентация по использованию

Во Франции до последнего времени извлекаемые из канализационных сетей отходы с высоким содержанием ОВ и воды подлежали вывозу на свалки, однако теперь это запрещено. В силу этого перед вывозом на свалку или, что лучше, перед утилизацией их следует подвергать промывке и частичному обезвоживанию.

Использование отходов в качестве материала для земляных работ (возведения насыпей, засыпки dna котлованов и т. п.) предполагает, что по своим показателям они должны соответствовать либо шлаку категории «V», отвечающей нормативным требованиям, приведенным в табл. 4 (выдержка из циркуляра от 9 мая 1994 г.), либо песку, содержащему органические материалы (см. категорию F1 стандарта NF P 11-300). В обоих случаях это должен быть продукт, содержащий менее 5 % ОВ, небольшие количества растворимых веществ и тяжелых металлов.

3.3. Обработка отходов от чистки канализационных сетей

Когда самосвал, перевозящий извлеченные из канализации отходы, сбрасывает свой груз в приемную яму, в нем присутствуют почти в равных количествах жидкие и твердые компоненты, к которым также добавляется вода от промывки кузова

Доставленная смесь самотеком или с помощью грейфера поступает в узел разделения

Крупные тела отделяют от песка с помощью барабанного грохота, а затем после отжима они, так же как и осадки с решеток, могут быть направлены на сооружения обработки бытовых отходов. Грязная жидкость, не задерживаемая грохотом, представляет собой смесь воды с песком, а также минеральными и органическими веществами. Ее пропускают через гидроциклон, а затем через сепаратор воды или просто через песчаный классификатор. В результате получают промытый песок и воду, содержащую органические и минеральные загрязнения, которую возвращают на очистные сооружения

Такая линия обработки гарантирует снижение содержания ОВ в промытом песке до уровня ниже 10%. Применение второго гидроциклона позволяет еще более понизить его — до уровня ниже 5%

Извлеченный песок рекомендуется хранить на открытом воздухе. В этих условиях присутствующие в нем ОВ подвергаются естественному разложению в течение 2 мес их содержание уменьшается до 2%, и извлеченный песок постепенно принимает нормальный песчаный цвет

Рекомендуемая минимальная продолжительность хранения составляет от 1 до 2 мес.

Хранить песок рекомендуется на бетонных площадках, обустроенных канавами для отвода стекающей с него воды, предотвращая таким образом любой контакт с окружающей территорией. Воду, отведенную с площадки для хранения песка, направляют в начало технологической линии сооружений.

Таблица 4

<i>Процентное содержание несгоревших материалов</i>	< 5 %
<i>Доля растворимых веществ</i>	< 5 %
<i>Потенциальные загрязнители, мг/кг</i>	
<i>Hg</i>	< 0,2
<i>Pb</i>	< 10
<i>Cd</i>	< 1
<i>As</i>	< 2
<i>Cr VI</i>	< 1,5
<i>SO₄²⁻</i>	< 10 000
<i>ООУ</i>	< 1500

3.4. Технологические линии обработки

Компания «Дегремон» разработала две линии обработки, наиболее экономически приспособленные для сооружений, принимающих около 8 гидроочистителей канализационных сетей в сутки (т. е. около 5 т отходов в 1 сут), к которым обычно добавляют песок, извлекаемый из песколовок очистных сооружений

3.4.1. Технологическая линия *Arenis* малой производительности

Линия *Arenis* малой производительности включает в себя (рис 9)

- грейферный ковш,
- барабанный грохот,
- промыватель-классификатор песка

Стадия промывки, предусматриваемая с определенным запасом, реализуется в барабанном грохоте; на ней не используется гидроциклон, но тем не менее она обеспечивает гарантированное содержание ОВ (< 5%)

Перед утилизацией песок следует хранить не менее 1 мес

3.4.2. Технологическая линия *Arenis* большой производительности

В состав линии *Arenis* большой производительности входит следующее оборудование (рис 10)

- 1 грейферный ковш,
- 1 барабанный грохот,
- 2 гидравлических классификатора,
- 2 гидроциклона,
- 1 денсиметрический лоток,
- 1 вибросушилка,
- 1 барабанная сетка для отвода слива классификатора

Эта линия гарантирует остаточное содержание ОВ на уровне 3 %, все рекомендации по выдерживанию отходов остаются в силе

4. Извлечение жиров и масел

4.1. Отделяемые вещества

Операции извлечения жиров и масел заключаются в отделении веществ, плотность которых несколько ниже плотности воды, в результате флотации (естественной или принудительной — см гл 3, п 4 1 1) в емкости достаточного объема

Жиры находятся в воде во взвешенном состоянии (при условии, что температура достаточно низка для их затвердевания), они имеют преимущественно животное (или растительное) происхождение, присутствуют в ГСВ и в ПСВ (аграрно-пищевая промышленность), в небольших количествах их можно также обнаружить в ливневых накопителях, лагунах, прудах и т.п. Они обычно присутствуют в воде в виде свободных частиц, точнее, агломератов с различными взвешенными веществами, от которых их следует отделять для обеспечения последующей флотации. На практике вместе с жирами всегда одновременно извлекаются некоторые плавающие материалы, например различные растительные (волокна) или животные (отходы скотобоен) остатки, пластические материалы и т.д.

Таким образом, при **извлечении жиров** пытаются добиться компромисса между максимальным задерживанием жиров и минимальным осаждением донных осадков, склонных к сбраживанию. Его эффективность с трудом поддается определению вследствие сложности, возникающих при отборе проб и проведении анализа.

Маслами принято называть жидкие, не смешивающиеся с водой вещества, в их перечень входят различные вещества типа растительных и минеральных масел и легких углеводородов. Термин **извлечение масел** обычно применяют в отношении процесса отделения масел, присутствующих в значительном количестве в ПСВ,

особенно в сточных водах предприятий химической промышленности (масла обычно отсутствуют в ГСВ, поскольку их сброс в канализацию запрещен)

4.2. Жироловки

4.2.1. Условия применения

4.2.1.1. Извлечение жиров перед сбросом сточных вод в канализацию

Извлечение жиров «на месте появления» сточных вод рекомендуется, а часто и предписывается для многих непромышленных предприятий, ресторанов, мелких населенных пунктов и т. п.

Стандартные сепараторы (или жировые камеры) производятся серийно для расходов до 20–30 л/с. Они рассчитаны на время пребывания сточных вод от 3 до 5 мин и скорость восходящего потока около 15 м/ч. При правильной эксплуатации эти аппараты могут задерживать до 80 % застывших жиров и накапливать до 40 л легких продуктов на литр в секунду поступающего потока. Сепараторы требуют регулярной чистки. Температура воды должна быть ниже 30 °С. Аппараты сконструированы таким образом, чтобы максимально предотвратить осаждение тяжелых веществ, однако в некоторых случаях полезно перед ними проводить обработку сточных вод в легко очищаемом резервуаре-отстойнике, позволяющем за время пребывания 1–3 мин отделить наиболее крупные загрязнения.

Для сточных вод некоторых предприятий аграрно-пищевой промышленности, содержащих значительные количества жиров, подлежащих удалению (в особенности это касается скотобоен, предприятий переработки мяса), рекомендуется установка отдельной жироловки, рассчитанной на гидравлическую нагрузку от 10 до 20 м³/ч на 1 м² полезной площади. При размещении перед сбросом сточных вод в канализацию этот аппарат защищает канализационную сеть от попадания в нее жиров; его полезно также устанавливать в качестве первой стадии обработки на сооружениях очистки специфических ПСВ.

4.2.1.2. Извлечение жиров при предварительной обработке на сооружениях очистки сточных вод

Первичный отстойник хорошо отделяет жир, скапливающийся на поверхности воды, однако он, как правило, плохо приспособлен для отвода значительных объемов жира, что влечет за собой значительные эксплуатационные трудности.

Если первичное отстаивание бытовых стоков не предусматривается, их обязательно следует подвергать обработке в жироловке, причем ее **предпочтительно осуществлять в сочетании с удалением песка** (при условии, что сооружение надлежащим образом рассчитано — время пребывания около 15 мин — и оснащено средствами для удаления ОВ, оседающих вместе с песком).

Жироловки не предназначены для удаления масел и углеводов, которые в случае их присутствия задерживаются на стадии первичного отстаивания.

4.2.2. Радиальная песколовка-жироловка

Радиальная песколовка-жироловка имеет цилиндрическую форму с диаметром от 3 до 8 м при глубине жидкости в центре аппарата от 3 до 5 м. Она оснащается погружным смесителем-аэратором типа «Aérolot», устанавливаемым по оси аппарата (фото 8).



Фото 8. Радиальная песколовка-жироловка (см. систему съема пены)

Смеситель-азратор оснащен подвижным центробежным насосом, установленным на глубине около 2 м и приводимым в движение погружным электродвигателем, вырабатывающим удельную мощность от 15 до 30 Вт на 1 м³ жидкости. Это устройство выполняет следующее

- обеспечивает создание вращательного потока в нижних зонах сооружения, облегчая стекание песка по стенкам бункера, имеющим наклон 45°;
- создает зону локализованной турбулентности, облегчающую отделение жиров и слипшихся в комки веществ;
- засасывает по воздухозаборной трубке некоторое количество атмосферного воздуха и высвобождает его в толще жидкости в форме мелких диспергированных пузырьков, образовавшиеся пузырьки преимущественно прилипают к частицам жира, обладающего гидрофобностью, и тем самым способствуют их флотации.

Вода в песколовку-жироловку подается тангенциально на погруженный в воду центральный цилиндрический отражатель, установленный вокруг смесителя-азратора. Отвод воды осуществляется через отверстие в цилиндрической части аппарата, расположенное ниже уровня жидкости.

Песок собирают так же, как описано выше в п. 2.3.2

Жир, плавающий на поверхности, непрерывно удаляется с помощью специальной системы со скребками, вращающейся с невысокой скоростью. Сдвигаемая жировая масса частично отжимается при движении по наклонной плоскости к выступающей сливной трубе и падает в приемный лоток. Затем жир обычно вывозят в специальных емкостях-хранилищах, заполняемых самотеком, или откачивают воздушными насосами, после чего его направляют на специальную переработку (см. аппарат *Biomaster*, п. 5.2).

4.2.3. Прямоугольная песколовка-жироловка

Прямоугольная песколовка-жироловка имеет те же размеры, что и прямоугольная песколовка, описанная в п. 2.3.3, и позволяет обрабатывать значительные расходы, достигающие до 5000 м³/ч (фото 9 и рис. 11).



Различают следующие зоны обработки на этих сооружениях:
 зона 1 — аэрируемая зона, в которой обводняются жироподобные вещества;
 зона 2 — спокойная зона концентрирования и удаления жиров с помощью системы скребков;
 зона 3 — комбинированный мостовой механизм, предназначенный для скребания жиров и извлечения песка насосом.

Фото 9. Прямоугольная песколовка-жироловка



Рис. 11. Схема прямоугольной песколовки-жироловки со астронным механическим аэратором

Поперечное сечение пескоструйки-жироструйки имеет форму, приспособленную к смыву песка поперечным потоком по наклонным стенкам, что благоприятствует его стеканию на дно сооружения. Вода, подаваемая на вход пескоструйки-жироструйки, выходит из нее с противоположной стороны через отверстие большого диаметра, расположенное в стенке сооружения ниже уровня жидкости, после чего проходит через водослив, с помощью которого обеспечивается постоянный уровень воды.

Прямоугольную пескоструйку-жироструйку с характерным медленным продольным потоком воды обычно оборудуют двумя сопряженными системами перемешивания и аэрирования, создающими поперечные вращательные потоки, не зависящие от расхода воды и допускающие в связи с этим значительные изменения скорости продольного переноса (которая может быть очень низкой) без каких-либо отрицательных последствий.

Входная зона предварительного удаления песка (если она имеется) может составлять до трети общей длины пескоструйки-жироструйки, она снабжена системой нагнетания воздуха с использованием подходящих воздушных диффузоров (например, типа *Vibrair*), которые создают удельную мощность аэрации $20-30 \text{ Вт/м}^3$. Нагнетаемый воздух поддерживает надлежащую скорость поперечной циркуляции и, благодаря эффекту турбулентности, способствует отделению ОВ, прилипших к частицам песка. Вместе с тем он препятствует скапливанию крупных частиц песка во входной зоне сооружения.

В остальной части сооружения, где осуществляется извлечение жиров и мелкого песка, установлена группа погруженных в воду и расположенных на одной прямой аэраторов, которые обеспечивают создание более медленного вращательного потока и флотацию жиров.

Извлечение песка производится теми же средствами (скребками, насосом или эрлифтом, установленным на передвижной мостовой конструкции, и т. п.), которые были описаны в п. 2.3.3.

Жиры, плавающие на поверхности воды, сдвигаются к концу сооружения с помощью скребков, установленных на мостовой конструкции, и извлекаются согласно одной из следующих схем:

- сдвиг к наклонной плоскости с выступающим переливом, после чего жиры медленно поступают в специальную яму, вывозятся вагонетками или откачиваются насосом,
- удаление через сливную задвижку (оснащенную механическим приводом с программным управлением), далее жиры перевозятся гидротранспортом на вспомогательное сооружение для специальной переработки (см. п. 5).

4.2.4. Прямоугольная жироструйка с аэраторами-смесителями в головной части

Иногда (при обработке воды, содержащей небольшие количества крупного песка) целесообразным оказывается использование описанного в п. 4.2.3 варианта, отличающегося наличием всего лишь одного или двух аэраторов-смесителей, размещаемых в головной части жироструйки ниже уровня воды на вертикальной оси устанавливается лопастная мешалка, под которую через диффузор подается сжатый воздух с регулируемым расходом. Такой аэратор-смеситель, предназначенный для крупных сооружений, выполняет те же функции, что и по-

грузной аэратор с возможностью отдельного регулирования перемешивания и аэрации

4.2.5. Технические характеристики жиroleвок

Понятие «жиры» используют для обозначения углеродсодержащих соединений трех групп, жирные кислоты, простые и сложные липиды. Для количественной оценки содержания жиров в сточных водах применяют различные методики. Наиболее специфичной из них является экстракция гексаном (экстрагируемые гексаном вещества, или ЭГВ) и метанолом. Ежесуточное поступление бытовыми сточными водами экстрагируемых гексаном жиров составляет от 15 до 20 г на одного эквивалентного жителя (ЭЖ). Они имеют плотность около 0,9 кг/дм³. Эффективность работы жиroleвок составляет от 5 до 15 % от общего количества веществ, экстрагируемых гексаном, причем концентрация жиров, извлеченных в процессе флотации, составляет по экстрагируемым гексаном веществам — от 13 до 100 г/л, по ХПК — от 40 до 300 г/л.

На первый взгляд может удивить низкая эффективность работы жиroleвок в отношении экстрагируемых гексаном веществ, однако не следует забывать, что:

- жиры представляют лишь небольшую долю всех веществ, экстрагируемых гексаном, поскольку в процессе такой «грубой» флотации без применения реагентов только загустевшие частицы этих веществ могут собираться пузырьками воздуха в более или менее крупные агрегаты (> 50 мкм);
- вместе с тем другие масла, присутствующие в форме тонких эмульсий или в растворенном виде, никоим образом не препятствуют биологическим процессам очистки сточных вод. Действительно, на уровне аэротенка лишь плавающие застывшие жиры имеют тенденцию к образованию «пены», скапливающейся на поверхности и способной служить «питомником» для воспроизводства нитчатых видов бактерий, таких как *Nocardia*.

4.3. Маслоловушки

4.3.1. Условия применения

Существует два основных типа ПСВ, для обработки которых используются маслоловушки

- сточные воды, имеющие более или менее постоянный уровень загрязненности маслами (производство и переработка нефти, производство пищевого растительного масла, станы холодной прокатки, аэропорты и т.п.);
- сточные воды, обычно слабо загрязненные маслами, но с возможностью пиковых скачков (ливневые воды нефтеперерабатывающих предприятий, возникающие при нагревании хранилищ конденсата, работающие на жидком топливе ТЭЦ, станы горячей прокатки).

Углеводороды, присутствующие в маслах, находятся

- либо в свободном состоянии;
- либо в состоянии тонкой неустойчивой механической эмульсии, которая в той или иной степени адсорбируется взвешенными в воде веществами;
- либо (реже встречающийся случай) в состоянии химической эмульсии (например, смазочно-охлаждающие жидкости на водной основе).

Гравитационное удаление масла может осуществляться лишь в двух первых случаях и зависит при этом от следующих показателей.

Таблица 5**Предварительные маслоуловители и маслоотделители**

Подача обрабатываемой воды	Предварительные маслоловушки	Грубые маслоловушки (40–50 мг/л углеводов)	Конечные маслоотделители (5–20 мг/л углеводов)
Под давлением	Закрытые сепараторы	Циклоны	Коалесцентные фильтры Гранулированные фильтры
Гравитационная	Тип API ¹ (прямоугольный)		
	С параллельными пластинами	Механические флотаторы ²	Напорные флотаторы ²
	Радиальные		

¹ API – American Petroleum Institute² См гл 3, п 4

- плотность масла, которая, как правило, составляет от 0,7 до 0,95 кг/дм³, но для некоторых тяжелых углеводов может превышать 1 кг/дм³,
- температура, повышение которой всегда благоприятствует процессу разделения,
- динамическая вязкость масел, которая может варьировать от нескольких сотых паскалей-секунд до значения, превышающего 0,2 Па·с, что для некоторых процессов является критическим

Удаление масел из перечисленных выше типов сточных вод может производиться в одну или две ступени.

- предварительное маслоотделение или удаление плавающих углеводов, эта операция может комбинироваться с удалением песка,
- удаление масла, конечной целью которого является более или менее полное удаление диспергированных углеводов (табл. 5).

4.3.2. Гравитационные предварительные маслоловушки

Оценить эффективность гравитационных предварительных маслоловушек, работающих обычно без применения реагентов, практически невозможно

- плотность углеводов и гранулометрическое распределение их капелек, т. е. скорость их отделения от воды, известны лишь в очень редких случаях;
- природа эмульсии плохо определена;
- пробоотбор перед сооружением практически невозможен

Гравитационные предварительные маслоловушки устраняют массивные нерегулярные поступления масел со сточной водой, а также наиболее крупные их капли.

Существует три типа таких установок

■ Продольные сепараторы (тип API)

Продольные сепараторы рассчитывают согласно стандартам Американского института нефти — *American Petroleum Institute* (отделение капелек диаметром свыше 150 мкм). Они имеют ширину от 1,8 до 6 м при глубине слоя воды от 0,6 до 2,4 м

Такие аппараты трудно накрывать (отсюда опасность возникновения запахов), а извлечение донных осадков сопряжено с неудобствами

■ Пластинчатые сепараторы

Использование принципа тонкослойного отстойника, оснащенного пластиковыми пластинами, имеющими плоскую или волнистую конфигурацию и отстоящими друг от друга на 4 см, позволило уменьшить время пребывания обрабатываемых вод в сооружении с нескольких часов до 60 и даже 30 мин. Пластинчатые сепараторы требуют большего ухода, их желательно применять для обработки относительно горячей воды (это предотвращает застывание масел), содержащей небольшие количества ВВ (для снижения расходов на дорогостоящую процедуру удаления донных осадков)

Поскольку пластинчатые сепараторы имеют модульную конструкцию, обработка значительных расходов требует большого числа модулей (каждый из них рассчитан на производительность 15–30 м³/ч), что влечет за собой трудности, связанные с размещением и укрытием сооружения, а также отводом отделенного верхнего слоя жидкости

■ Радиальные сепараторы

Радиальные сепараторы осуществляют отделение масел от сточной воды в двух последовательно размещенных камерах (рис. 12) первая, накрытая, камера предотвращает утечку в атмосферу легких и летучих веществ, а во второй осуществляется удаление скребками донных осадков и сфлотированных на поверхности воды масс (гребки)

4.4. Рекуперация масел и плавающих веществ в резервуарах и лагунах

Отвод слоя масел (и/или плавающих веществ), собранного на поверхности спокойной воды, может осуществляться аппаратами и устройствами, которые не оказывают никакого очищающего действия на воду, несущую эти вещества. Различают четыре типа подобных устройств

■ Ориентируемые лотки и водосливы

Лотки и водосливы, устанавливаемые неподвижно (или плавающие на поверхности в случае изменяющегося уровня) и имеющие простую конструкцию, нуждаются в дополнительном приспособлении для подвода слоя масел. Их недостатком является значительный унос воды

■ Барабанные или ленточные олеофильные коллекторы

Принцип действия таких коллекторов основан на прилипанию масла к их гидрофобной поверхности. Они способны извлекать из воды масло с малым содержанием в нем воды и могут работать при значительных колебаниях уровня воды. В случае больших поверхностей для их применения необходимо обеспечить сдвиг слоя масел по поверхности обрабатываемой воды с помощью гребков



■ Неподвижные механические маслоотделители

Слой масел с помощью тока воды, создаваемого насосным устройством, транспортируется на большое расстояние к зоне сбора, в этом случае также вместе с маслом извлекается значительное количество воды

■ Отделение масла с использованием вихревого потока

Неподвижная (чаще — плавающая) система позволяет собирать масло в своем центре, что снижает количество откачиваемой с маслом воды

5. Специфическая обработка жиров

5.1. Обрабатываемые вещества

Обрабатываемыми веществами преимущественно являются жиры, собираемые жироловками очистных сооружений, однако они могут также поступать и из внешних источников, таких, например, как различные предприятия общественного питания и т. п.

5.2. Принцип способа Biomaster

5.2.1. Описание способа

Способ **Biomaster** — это специфический способ аэробного биологического разложения жировых остатков с типичной концентрацией по ХПК (триглицеридам) на уровне 50–300 г/л. Жиры, подлежащие обработке, приводятся в контакт с очищаю-

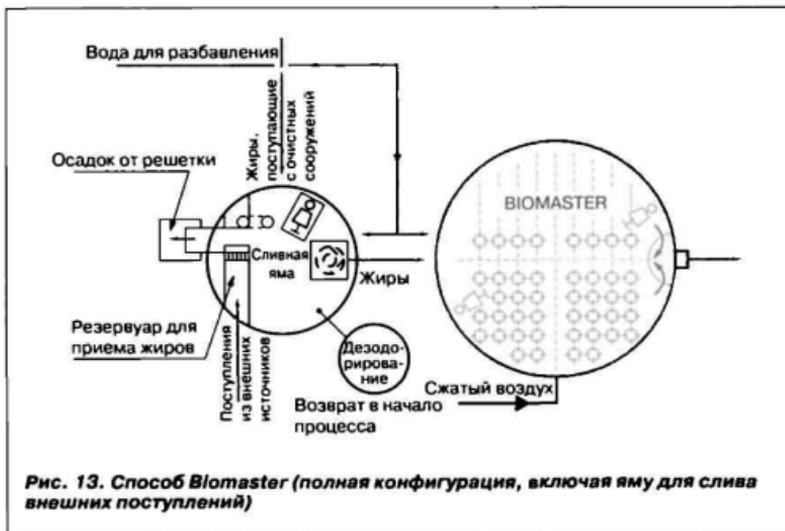


Рис. 13. Способ Biomaster (полная конфигурация, включая яму для слива внешних поступлений)

щей биомассой, которая специально адаптирована для разложения углеродной основы этого продукта.

Разложение происходит в **две последовательные стадии**.

- гидролиз жиров на жирные кислоты и глицерин,
- окисление жирных кислот до H_2O и CO_2 .

Искомые характеристики процесса биоразложения достигаются при времени пребывания жиров в реакторе около 3 нед.

Процесс разложения является экзотермическим; особенно ярко эффект наблюдается в случае обработки концентрированных жиров при номинальной нагрузке и эффективной аэрации — возрастание температуры весьма значительно. Это обстоятельство вынуждает принимать особые меры предосторожности при проектировании оборудования и его эксплуатации, предусматривая управление концентрацией поступающих жиров, подвод воды, позволяющий соблюдать условия, благоприятные для мезофильного процесса (ниже $42\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Введение реагентов, содержащих **азот и фосфор**, гарантирует развитие биомассы в равновесной среде. Эти элементы вносят, например, в виде двухаммонийного фосфата.

Введение извести $Ca(OH)_2$ или иного продукта, содержащего кальций, полезно благодаря их противоспецификающему действию

Учитывая повышенные концентрации субстрата, применение осветлителя и рециркулирование биомассы к азотатору не требуются, поскольку количество образующегося осадка превышает объем биомассы, необходимый для азотатора. По этой причине образующийся осадок и обработанная вода отводятся переливом в аэротенк очистных сооружений

Схема, приведенная на рис. 13, иллюстрирует полную конфигурацию, включая яму для слива внешних поступлений.

5.2.2. Преимущества

Основные преимущества способа

- компактность установки, автономность, простая автоматизация, возможность приема на обработку жиров, поступающих из внешних источников,
- снижение нагрузки по ОВ на очистные сооружения,
- отсутствие расходов воды на транспортировку жиросодержащих отходов на свалки или мусоросжигательные заводы,
- простое техническое обслуживание установки,
- слабый источник запахов (кроме сливной ямы),
- нормальная работа очистных сооружений, поскольку осадок, образующийся в результате обработки на установке **Blomaster**, ускоряет разложение жиров, не задержанных жиroleвкой, и ограничивает развитие нитчатых микроорганизмов, например *Nocardia*

5.3. Технические показатели

В табл. 6 приведены данные по эффективности способа **Blomaster**, полученные на различных площадках. Но эти показатели трудно гарантировать по следующим причинам

Таблица 6
Эффективность способа Blomaster

Проба	Вещества, экстрагируемые гексаном	ХПК
Проба на выходе с жиroleвки без обработки ¹	Минимум 80 %	Минимум 60 %
Проба после двухчасового стаивания или центрифугирования ²	Минимум 98 %	Минимум 96 %

¹ С избытком биомассы

² Без избытка биомассы

- трудности отбора проб жиров на входе установки,
- возможные случаи добавления воды (при необходимости ограничения температуры),
- процентное содержание на выходе станции смеси очищенной воды и избытка биомассы

5.4. Другие процессы

5.4.1. Анаэробное сбраживание

Переработка жиров методом сбраживания общепринята в англоязычных странах. Это требует процеживания на сите с отверстиями размером 6 мм либо всех сточных

вод, либо только отделенного жира. При условии правильного смешивания с осадком жиры хорошо поддаются метановому сбраживанию. Перемешивание биогазом в установках компании «Дегремон» предотвращает формирование «шапки» (что прежде считалось недостатком этого метода).

5.4.2. Компостирование

Компостирование состоит в смешивании жиров (предварительно отделенных от максимально возможного количества воды) с материалами (древесными опилками и стружкой, соломой и т. п.), пропускающими воздух, необходимый для разложения жиров.

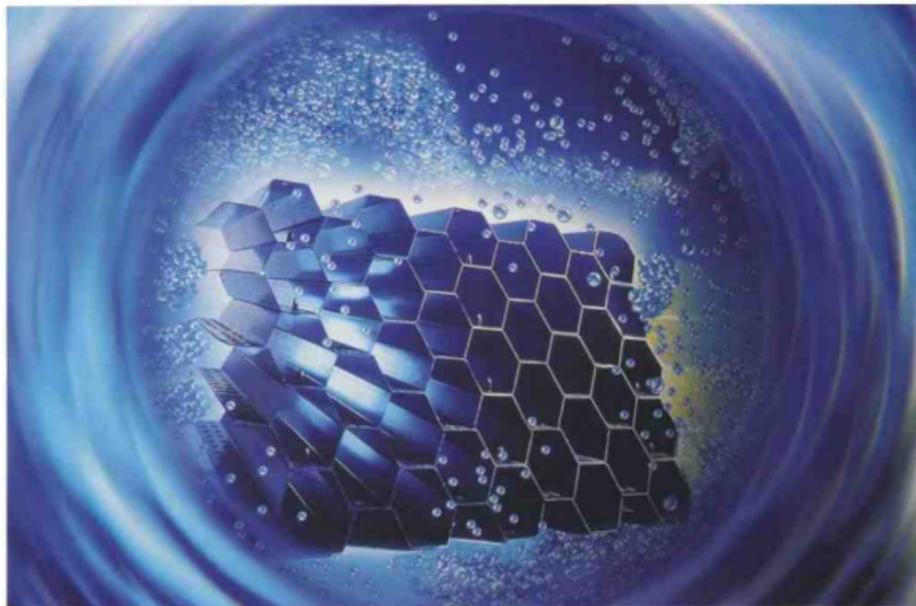
Процесс требует большого времени для протекания реакции (до 7 мес.) и значительной свободной площади для размещения компостируемых материалов. Кроме того, он может сопровождаться различными негативными явлениями (возникновением запаха, выщелачиванием и т. п.).

Качество получаемого компоста часто невысоко.

5.4.3. Сжигание

Процесс заключается в удалении жиров путем «рекуперации» их высокой теплопроводной способности.

Преимущество сжигания состоит в том, что жиры превращаются в инертный остаток. Метод сжигания может рассматриваться только для очистных сооружений, уже оснащенных печью для сжигания осадков. Известны также примеры совместного сжигания жиров с бытовым мусором.



Глава

10

-
1. СМЕСИТЕЛИ РЕАГЕНТОВ 817
 2. ФЛОКУЛЯТОРЫ 820
 3. ОТСТОЙНИКИ 825
 4. ФЛОТАТОРЫ 863

Флокуляторы, отстойники, флотаторы

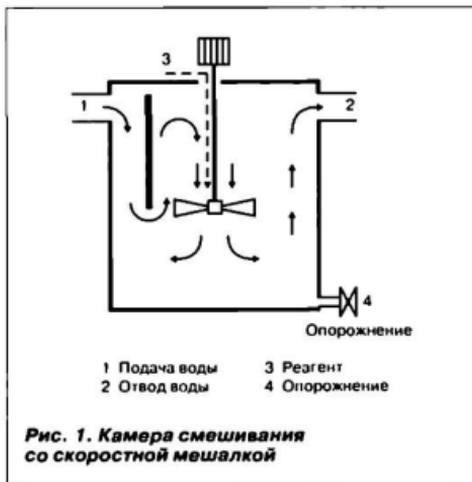
1. Смесители реагентов

Чем более эффективен процесс коагуляционной обработки воды, тем лучше протекает процесс флокуляции (см. гл. 3, п. 1.1.3). В зоне коагуляции смешение реагента с водой должно происходить практически мгновенно, что можно обеспечить за счет повышенного градиента скорости. В зависимости от применяемой технологии время пребывания воды в смесителе может меняться от нескольких секунд до нескольких минут, а соответствующие реакторы обычно называют **коагуляторами** (при условии, что они представляют собой самостоятельный элемент сооружения).

На простых сооружениях и при обработке относительно теплых, легко флокулируемых вод подача реагента непосредственно в поступающий поток воды может давать удовлетворительные результаты, однако, как правило, необходим предварительный этап управляемого механического смешивания.

1.1. Быстрые пропеллерные смесители

Пропеллерные смесители имеют цилиндрическую (стальные) или кубическую (бетонные) конфигурацию и оснащены лопастной мешалкой, которая может вращаться с высокой скоростью (рис. 1).



В зависимости от конструкции аппаратов время пребывания в них варьируется от 1 до 3 мин (для наиболее крупногабаритных). Градиент скорости может составлять от 200 до 1000 с⁻¹ в зависимости от конкретного применения аппарата. Реагент вводится в зону наибольшей турбулентности выше или ниже мешалки в зависимости от режима ее работы (всасывание или нагнетание).

В тех случаях, когда градиент скорости необходимо изменять в зависимости от температуры или уровня загрязнения обрабатываемой воды, мешалку оснащают регулятором скорости вращения.

1.2. Статические смесители

Статические смесители устанавливаются непосредственно на трубопроводах или в открытых каналах.

1.2.1. Статические смесители на трубопроводах

Статические смесители, встраиваемые в трубопроводы, характеризуются очень высокими градиентами скорости (от 1000 до 30 000 с⁻¹) и малым временем пребывания воды в нем. Рассеиваемая в них энергия соответствует потере напора. Поэтому эффективность этих смесителей снижается, когда реальный расход воды становится существенно ниже номинального. Кроме того, качество формируемой смеси зависит от конструкции аппарата.

1.2.1.1. Простой смеситель с форсункой

В конструкцию такого смесителя входит форсунка, за которой обычно устанавливается диафрагма. Он позволяет вводить в воду легко смешивающиеся с ней реагенты. Выпускаются стандартные модели этих устройств, предназначенные для трубопроводов диаметром от 100 до 400 мм. Потеря напора составляет не менее 0,3 м вод. ст. Смешивание происходит на большой протяженности трубопровода, которая в зависимости от модели смесителя может в 50–100 раз превышать его диаметр.

1.2.1.2. Смеситель с насадкой

С помощью смесителя с насадкой в воду вводят минеральные реагенты, полимеры и т. п. Насадки обычно представляют собой лопатки, пластины или винт с обратным шагом. Потеря напора составляет, как правило, от 1 до 5 м вод. ст. Устройство позволяет вводить концентрированные растворы реагентов с расходом, составляющим всего лишь 0,01 % расхода исходной воды. Полное смешивание достигается на расстоянии, которое в 2–6 раз превышает диаметр трубопровода.

1.2.1.3. Радиальный смеситель Radialmix

С помощью статического смесителя с радиальным гидравлическим рассеиванием Radialmix можно вводить в воду минеральные реагенты, полимеры и т.п. В его конструкцию входит сопло, установленное по оси трубопровода, и диафрагма с периферийным выходом из нее (рис. 2).

Стандартные модели смесителя Radialmix предназначены для трубопроводов диаметром от 100 до 400 мм. В зависимости от модели и применения смесителя потеря напора может составлять от 0,2 до 5 м вод. ст. Такое устройство позволяет вводить в воду концентрированные растворы с очень низким расходом (до 0,0005 % расхода исходной воды). Полное смешивание осуществляется на расстоянии, меньшем, чем диаметр трубопровода.

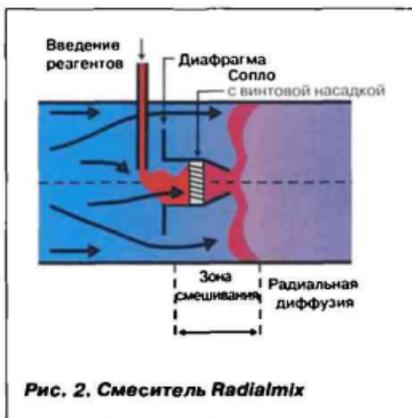


Рис. 2. Смеситель Radialmix

1.2.1.4. Смеситель для осадка типа MSC

Смеситель циклонного типа (MSC — от фр. *mélangeur static cyclonique*) предназначен для кондиционирования осадков (рис. 3). Он имеет цилиндрическую часть, к которой по направлению потока примыкает конический элемент; в цилиндрическую часть подают осадок и реагенты, а в коническом элементе части процесс смешивания завершается благодаря вращению потока осадка. В цилиндрической части установлены два регулируемых отражателя.

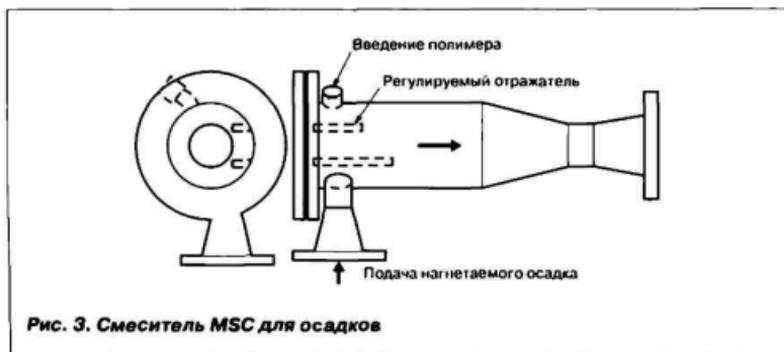
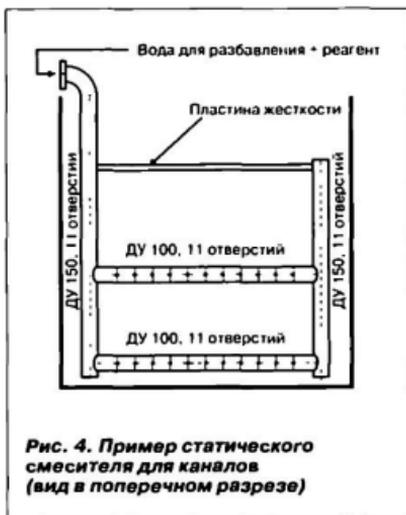


Рис. 3. Смеситель MSC для осадков

1.2.2. Статические смесители, устанавливаемые в каналах



Характер движения воды в канале не позволяет выделять энергию (что выражается в виде потери напора), которая необходима для реализации процесса смешивания. Поэтому на статические смесители, устанавливаемые в каналах, подают под давлением воду для разбавления с расходом, составляющим от 2 до 10 % расхода исходной воды.

Статические смесители для каналов обычно имеют вид простой перфорированной трубки или решетки. Вода для разбавления, которая за счет давления обеспечивает необходимую выходную скорость из отверстий трубки или решетки, в процессе диффузии реагента перемешивается с ним за несколько метров до поступления образовавшейся смеси в собственно зону смешивания (рис. 4).

Падение напора в этой системе введения реагента составляет от 2 до 10 м вод ст. С помощью таких смесителей можно вводить в воду концентрированные растворы. Полное смешивание происходит в течение 10–20 с.

1.3. Смеситель Turbactor

Смеситель **Turbactor** (рис. 5) — это закрытый, способный работать под давлением реактор, в котором происходит быстрое перемешивание без применения механических средств. Смеситель состоит из двух зон:

- зона энергичного перемешивания, осуществляемого с помощью гидравлических устройств (гидрожектор).
- зона контакта без пересечения потоков, обеспечивающая возможность протекания последующей химической реакции.

Смеситель может оснащаться средствами регулирования (по показаниям датчиков значений pH и гН), благодаря чему он пригоден не только для коагуляции, но также для проведения в нем нейтрализации и окислительно-восстановительных процессов (например, обезвреживание и др.).

Минимальное время пребывания обрабатываемой воды в смесителе **Turbactor** составляет около 2 мин, а градиент скорости — 600 с^{-1} . Смеситель изготавливается из пластмассы или стали с защитным покрытием.

2. Флокуляторы

Флокуляцию осуществляют в специальных резервуарах — флокуляторах, оснащаемых системами перемешивания. Система перемешивания, объем флокулятора

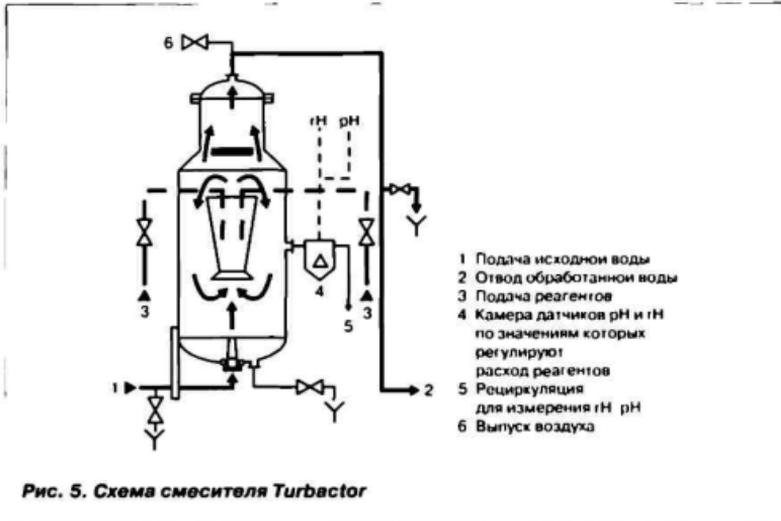


Рис. 5. Схема смесителя Turbactor



Фото 1. Смеситель Turbactor

и рассеиваемая в нем энергия различаются в зависимости от его назначения и характера обрабатываемой жидкости

Флокулятор, в который поступает предварительно скоагулированная вода, характеризуется (см. гл. 3, п. 1) следующими показателями: **градиент скорости G**, **время контакта**, **предельные локальные скорости жидкости и флокул**, под действием которых не должны возникать усилия сдвига, способные разрушить уже сформировавшиеся флокулы

Геометрические параметры резервуара, системы перемешивания и всего сопутствующего оборудования флокулятора выбраны таким образом, чтобы

- предотвращать формирование застойных зон (например, зоны осаждения на дне аппарата),
- наилучшим образом распределять потоки жидкости по всему объему (например, благодаря установке периферийных отражателей в радиальных аппаратах),
- максимально ограничивать возможность «проскока» потоков между входом и выходом жидкости

Наконец, конструкция сооружения должна обеспечивать сохранность сформировавшихся флоккул на всем пути их перемещения от флокулятора в зону отстаивания или флотации. В зависимости от качества обрабатываемой воды скорость перехода потока поверхностных вод в зону осветления адаптирована к свойствам флокул гидроксидов металлов и составляет

- для неустойчивых хлопков $v < 0,20$ м/с,
- для прочных хлопков $v < 0,50$ м/с

Применяются флокуляторы двух типов

- флокуляторы, оборудованные подвижным устройством перемешивания (флокуляторы с механическим перемешиванием),
- флокуляторы с отражателями (перегородчатые флокуляторы) или статические флокуляторы

2.1. Флокуляторы с механическим перемешиванием

2.1.1. Флокуляторы с барьерными мешалками

Флокуляторы с барьерными мешалками в наибольшей степени подходят для крупных станций (высокий расход обрабатываемой воды) и используются, например, при обработке питьевой воды



Фото 2. Флокуляторы с барьерными мешалками

Мешалки состоят из укрепленных на одной оси решеток, составленных из пластин (фото 2). Мешалки устанавливаются в плоскости, поперечной потоку воды, на равном расстоянии друг от друга, на горизонтальной или вертикальной оси. Комплекс таких мешалок приводится в движение редукторным двигателем, который может оснащаться регулятором скорости. Возможны конструкции цепного или прямого привода. В последнем случае устраняются возможные проблемы, связанные с коррозией цепи и уходом за ней. При установке мешалок на горизонтальной оси необходимо обеспечить герметичность ее прохода через стенку

2.1.2. Флокуляторы с пропеллерными мешалками

Движущим элементом пропеллерной мешалки является трех- или четырехлопастный винт (пропеллер), устанавливаемый на вертикальной оси и приводимый в движение непосредственно редукторным двигателем, обычно имеющим регулятор скорости (фото 3)

В общем случае конструкция таких аппаратов соответствует схеме на рис 1, однако используется винт другого типа, и работает он на других скоростях вращения, что обусловлено необходимостью соблюдения условий, накладываемых на компоненты флокулятора (градиент энергии, отсутствие локальных превышений скорости) Так например, для флокул гидроксидов металлов окружная скорость перемешивающего пропеллера не должна превышать 50 см/с

Для сохранения целостности флокул предпочтительно применять профилированные винты со значительной осевой составляющей, которые обеспечивают более высокую окружную скорость и больший поток воды при наименьшей локальной турбулентности



Фото 3. Пропеллерные («сабельные») винты для флокуляторов

2.2. Статические флокуляторы

Статические флокуляторы используются реже, чем упомянутые выше. Конструктивно они представляют собой набор отражающих пластин (фото 4), с помощью которых осуществляются резкие изменения направления «поршневого» потока обрабатываемой жидкости. При этом происходит выделение энергии, необходимой для флокуляции, что сопровождается потерей напора.

Поскольку величина этой энергии прямо пропорциональна поперечной скорости, особое внимание следует уделять системам с переменным расходом обрабатываемой воды.

Подобные флокуляторы целесообразно использовать для обработки воды, содержащей небольшие количества взвешенных веществ (опасность отложений осадка)



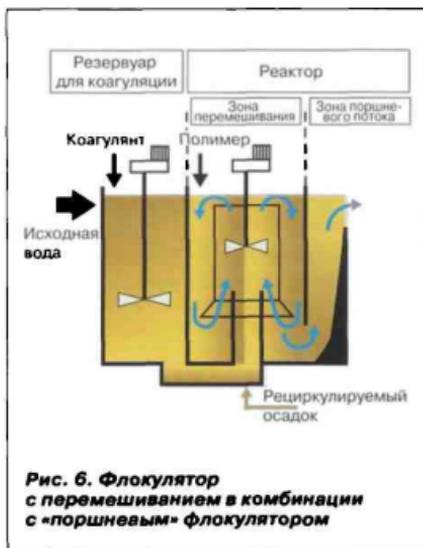
Фото 4. Статический флокулятор (вид на отражатели). Станция питьевой воды «Lake DeForest» (Нью-Йорк, США)

2.3. Практическая реализация

Для повышения качества флокул полезно в течение заданного времени производить обработку на двух (или даже трех) флокуляторах, установленных последовательно. Такая компоновка оборудования позволяет.

- регулировать градиент скорости (снижение его величины от одного резервуара к другому);
- при применении флокуляторов с перемешиванием осуществлять смещенное во времени или дробное введение реагентов,
- ограничить глубину сооружения при больших расходах

В качестве примера оптимизации можно привести **флокулятор с перемешиванием в комбинации с «поршневым» флокулятором** (рис 6)



В качестве флокулятора с перемешиванием используется реактор с выделением значительной энергии, в котором формируются небольшие, но плотные флокулы, а «поршневой» флокулятор представляет собой реактор с малым выделением энергии, в котором происходит увеличение размеров флокул. Комбинация двух флокуляторов — это наиболее совершенная разработка в серии аппаратов подобного типа компании «Дегремон». Она применяется, в частности, в установках **Densadeg**.

В этом конкретном применении флокуляция оптимальна за счет следующего

- сильно концентрированные осадки рециркулируют с регулируемым расходом.

- в первом реакторе пропеллерная мешалка помещена в цилиндрический корпус, что позволяет надлежащим образом перемешивать системы вода–осадок и вода–полимер (подача полимера производится под пропеллер мешалки) до однородной жидкос-

ти во всем объеме реактора и тем самым избежать появления донных отложений,

- скорость вращения пропеллера в 2–3 раза превышает таковую у обычных флокуляторов, благодаря чему легкие крупные хлопья разрушаются, но образующиеся фрагменты при введении полимера сразу же объединяются в агломераты, в результате чего формируются более плотные флокулы, именно этим объясняются высокие скорость осветления и концентрация осадков, извлекаемых из установки **Densadeg**.

- наличие двух последовательно установленных реакторов минимизирует опасность замыкания потока,

- в результате «поршневого» потока в завершающей зоне обработки (фактически она формируется двумя последовательно размещенными камерами с нисходящим и восходящим потоками и уменьшающимся градиентом скорости) обра-

зуются флоккулы среднего размера, но отличающиеся высокой плотностью и однородностью

3. Отстойники

Элементы, определяющие скорость осаждения флоккул после физико-химической обработки воды в различных типах отстойников, описаны в гл. 3, п. 3. Поскольку вторичные отстойники (осветлители в системах очистки сточных вод активным илом) имеют особые ограничения, обусловленные специфическими свойствами активных илов (см. гл. 4, п. 2.1), семейство соответствующих сооружений производства компании «Дегремон» рассматривается отдельно от остальных (в п. 3.6), как и отстойники, работающие в качестве сгустителей осадка (гл. 18, п. 2).

В п. 3.8 кратко рассмотрены устройства для отвода осадков, общие для большинства отстойников

3.1. Статические отстойники

К статическим отстойникам относят сооружения, в которых нет ни рециркуляции осадка, ни слоя осадка, хотя фактически отстаивание в этих сооружениях осуществляется в непрерывном, а не в периодическом режиме.

В зависимости от расхода поступающей на обработку исходной воды, количества взвешенных веществ (ВВ) в ней и их природы, объема подлежащих отводу осадков и наклона днища отстойник оснащается (или не оснащается) механической скребковой системой сдвига осадка

Статическое отстаивание, как правило, применяют

— при обработке **речных вод**:

- для загрязненной воды — на первой ступени отстаивания (**грязеудаление**) перед основным отстаиванием в контакте с осадком и предпочтительно после коагуляции с высоким градиентом скорости и с использованием, в зависимости от содержания ВВ в исходной воде (см. гл. 22, п. 1.4.3.1), анионного или катионного полимера (если применение последнего разрешено), при этом целесообразно устанавливать отстойники с механической скребковой системой;
- для основного отстаивания после коагуляции и флокуляции на **небольших простых водопроводных ствциях**, сооружаемых в развивающихся странах с невысокой стоимостью земли, особенно если строительство, оборудование и эксплуатация отстойников других типов обходится слишком дорого,

— при обработке **сточных вод**.

- наиболее часто для **первичного отстаивания**, независимо от расхода, или при **физико-химической обработке** (коагуляция-флокуляция) городских и промышленных сточных вод (например, гальваническое производство, металлообработка, горнодобывающая, металлургическая и другие отрасли промышленности) по меньшей мере при невысоких расходах ($< 500 \text{ м}^3/\text{ч}$);
- для **вторичного отстаивания**; в этом случае отстойники называют также осветлителями (см. п. 3.6).

Допустимые значения скорости Хазена (Hazen) (см. гл. 3, п. 3.1.1.4) для сфлокулированной воды обычно лежат в области от 0,5 до 2 м/ч, при наличии зернистых материалов (например, окислы, оябразующейся при прокатке) или при предварительном отстаивании (например, грязеудаление) эти скорости более высоки.

3.1.1. Простые отстойники без скребкового механизма

■ Статические цилиндрикоконические отстойники

В статических цилиндрикоконических отстойниках обрабатываемая вода течет практически вертикально. Их применяют на станциях с небольшим расходом (примерно до $20 \text{ м}^3/\text{ч}$), особенно при физико-химической очистке промышленных сточных вод (ПСВ). Их используют также на более крупных станциях, если объем подлежащего отделению осадка незначителен, а его плотность велика. Поскольку угол наклона стенки конической части аппарата в зависимости от природы осадка должен составлять от 45 до 65° , диаметр отстойника ограничивается $6\text{--}7 \text{ м}$.

■ Прямоугольные статические отстойники с горизонтальным потоком

Отстойники данного типа применяются только в качестве грязеудалителей. Когда требуется извлечь осадок, работу сооружения останавливают, спускают воду и удаляют скопившийся осадок. Чаще всего с помощью гидромонитора или, реже, скреперного транспортера. Из-за необходимости перерывов в работе таких отстойников и потребности в дополнительной рабочей силе их использование можно рекомендовать лишь на станциях небольшой мощности.

3.1.2. Статические отстойники с механической скребковой системой удаления осадка

Применение механических скребковых устройств для удаления осадка целесообразно при площади поверхности отстойника свыше $30\text{--}40 \text{ м}^2$. В таких сооружениях становится излишним создание значительного наклона дна, необходимого для естественного стекания осадка, поэтому его существенно уменьшают (до 2% при образовании легких осадков), что делает возможным строительство экономически более эффективных крупных сооружений небольшой глубины.

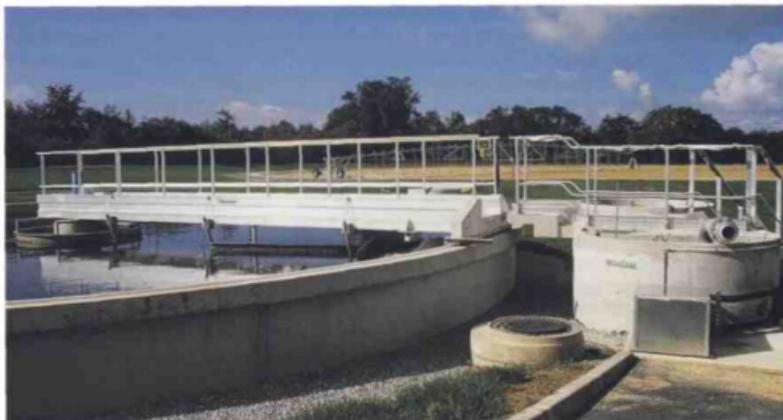


Фото 5. Радиальный отстойник EFA с мостовым скребковым механизмом (см. п. 3.6.2.1)

Скребокная система состоит из одного или нескольких скребков, перемещающих осадок по днущу сооружения, она крепится к передвижному мостику, который и приводит ее в движение (фото 5) мостик может либо перемещаться в продольном направлении, осуществляя возвратно-поступательное движение (прямоугольные отстойники), либо вращаться вокруг центральной оси (радиальные отстойники), мостик с подвешенными к нему скребками образует так называемый **мостовой скребковый механизм**

Скребокная система позволяет сдвигать осадки в одну или несколько ям для последующего отвода, такой способ сбора осадков способствует их сгущению, которое при определенных условиях можно повысить за счет устройства ям-концентраторов. Осадки откачивают из ям-концентраторов специальной автоматизированной системой по мере истечения допустимого срока их накопления (который обычно небольшой, поскольку при слишком долгом хранении в яме существует опасность затвердевания осадка в результате схватывания или анаэробного разложения)

3.1.2.1. Радиальные отстойники

В зависимости от массы удаляемого осадка используется тот или иной тип радиального отстойника со скребковым механизмом, такие сооружения различаются конструкцией донного скребка (сплошной одиночный скребок или несколько скребков, расположенных в форме жалюзи) и передвижного мостика, несущего скребковый механизм (радиальный, оснащенный противолежащими консолями или без таковых, либо диаметральный), причем привод мостика может быть как периферийным, так и центральным (фото 6 и 7)

Радиальные отстойники наиболее часто применяются для **первичного осветления** городских сточных вод (ГСВ), компания «Дегремон» предлагает два типа таких отстойников для сооружений различной мощности. **FA** (диаметр от 5 до 24 м) и **P2R** (диаметр от 26 до 40 м) Те и другие оснащены приводом периферийного типа ко-



Фото 6. Комплекс первичных отстойников на очистных сооружениях в г. Газиянтеп (Турция). Производительность 200 000 м³/сут



Фото 7. Головка привода скребкового механизма в бетонном резервуаре первичного отстойника



Фото 8. Отстойник типа P2R; двигатель-редуктор периферийного привода

леса с резиновыми шинами, приводящиеся в движение редукторным двигателем, перемещаются по внешней стенке отстойника (фото 8). Рекомендуемая средняя скорость отставания составляет 1,5–2 м/ч, максимальная скорость при пиковых нагрузках — 4 м/ч. В данном случае не требуется добиваться максимального удаления взвешенных загрязнений, определяющих величину БПК, что часто необходимо для проведения последующих процессов нитрификации–денитрификации. Скорость перемещения мостика — около 4 см/с. При необходимости отстойники могут оснащаться инфракрасными лампами в целях борьбы с обледенением рельса для приводных колес.

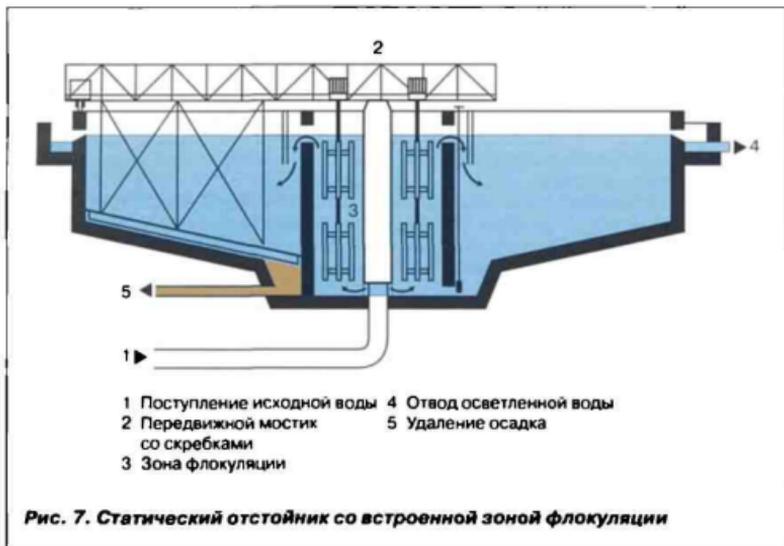


Фото 9. Управляющая головка привода Centrideg

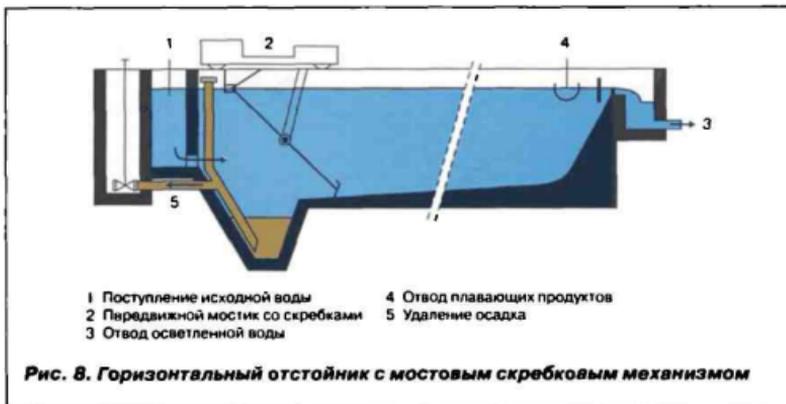
При обработке **природных вод** в радиальных отстойниках с периферийным приводом скребкового механизма возможно создание центральной зоны флокуляции (которая также может очищаться скребками в случае сильно загрязненных вод), оснащаемой вертикальными барьерными мешалками (см фото 6) Подобное сооружение со встроенным флокулятором представляет интерес с точки зрения гидравлики и компактности конструкции, такие отстойники часто называют осветлителями-флокуляторами.

В особо крупных отстойниках (диаметр свыше 40 м) и при обработке сильно загрязненных вод (например, на стадии грязеудаления) можно также применять системы центрального привода, редукторные двигатели (головка привода **Centrideg** — фото 9) которых устанавливаются на оси резервуара

3.1.2.2. Горизонтальные отстойники

Горизонтальные отстойники имеют меньшую распространенность Дело в том, что, хотя, если их требуется много, можно получить выигрыш в занимаемой площади в сравнении с радиальными отстойниками, по своим технико-экономическим показателям они, как правило, уступают другим типам отстойников

Горизонтальный отстойник (рис 8) представляет собой резервуар с горизонтальным потоком обрабатываемой воды На резервуаре установлен мостовой скребковый механизм, который перемещает осадок в приемную яму, находящуюся в начале отстойника Уклон днища такого сооружения может ограничиваться 1 %



При такой конструкции отстойника очень важно обеспечить надлежащее распределение обрабатываемой воды по всей его ширине Для этого оборудуют специальный канал с водосливами или отверстиями, расположенными ниже уровня воды (распределение воды должно оставаться равномерным в широком диапазоне значений расхода). По мере перемещения воды к выходу из отстойника вещества, способные к седиментации, оседают на его дно. На выходе из отстойника осветленная вода переливается в один или несколько сборных лотков

Мостовой скребковый механизм, перемещающийся вдоль стенок отстойника, совершает возвратно-поступательное движение Поверхностные гребки, связанные с

донными, сгоняют образовавшуюся пену к входу в отстойник либо перемещают ее к выходу из него при возвратном движении мостика. Существует показатель максимально допустимого времени между двумя проходами скребкового механизма через одну и ту же точку отстойника, при превышении которого начинается ферментация и образование скоплений неудаленного осадка. Скорость перемещения скребков составляет около 2–3 см/с, поэтому длина отстойника на один скребковый механизм не должна превышать 60–80 м.

Конфигурацию отстойника, отвечающую наилучшим гидравлическим условиям, получают при соотношении его длины к ширине менее 6. Глубина самого резервуара обычно составляет от 2,5 до 4 м.

Прямоугольные горизонтальные отстойники имеют два существенных недостатка

- даже при тщательном контроле за распределением воды допустимая скорость ее потока остается ниже скорости, обычно поддерживаемой в радиальных отстойниках,
- устройства и приспособления для сбора осадка конструкционно более сложны, а их обслуживание сопряжено с определенными трудностями

3.2. Тонкослойные статические отстойники

3.2.1. Трубчатые модули

Принцип действия трубчатых модулей подробно рассматривается в гл. 3, п. 3.3

Выбор конструкции модуля и способа его размещения позволил компании «Дегремон» оптимизировать процесс тонкослойного отстаивания для различных типов подлежащей обработке воды

■ Выбор модуля

- Выбор формы сечения модуля было принято шестигранное сечение, поскольку помимо преимуществ, перечисленных ранее (гл. 3), оно позволяет формировать комплекты модулей, которые легко устанавливаются внутри отстойника и не изгибаются под воздействием веса скопившегося на них осадка
- Выбор диаметра сечения модуля (табл. 1):
 - тип DN50 предназначен для процессов осветления и декарбонатации,
 - тип DN80 предназначен для очистки ГСВ, такой размер ячейки (прохода) вполне достаточен для предотвращения забивания модуля

Таблица 1
Трубчатые модули
компании «Дегремон»

Модули с шестигранным сечением			
Гидравлический диаметр, мм	80	50	
Угол наклона	60	60	
Длина, м	1,5	0,75	1,5
Соотношение площадей м ² модуля/м ² отстойника	10,8	8,7	17,4



Фото 10. Трубчатые модули

■ Размещение

Эффективность разделения фаз зависит от достигаемой степени равномерности распределения воды по модулям отстойника. Система размещения модулей и гидравлического распределения по потоку на выходе, разработанная компанией «Дегремон» и защищенная ее патентом, позволяет добиться локальных скоростей в модуле, весьма близких к средней скорости, тогда как без применения этого эффективного устройства равномерного распределения жидкости локальные скорости в отдельных зонах тонкослойных отстойников могут вдвое превышать среднюю скорость.

Таким образом, надлежащий выбор модуля и обеспечение равномерного распределения воды по модулям позволяют получать качественную осветленную воду даже при высоких скоростях ее обработки.

3.2.2. Тонкослойные отстойники без флокуляции *Sédipac D* и 3D

Тонкослойные отстойники *Sédipac* используются главным образом для первичного осветления ГСВ без применения реагентов.

3.2.2.1. Отстойник *Sédipac D*

Основная функция первичного тонкослойного отстойника *Sédipac D* состоит в отделении осаждающихся веществ от исходной воды.

Отстойник *Sédipac D* устанавливают после сооружений традиционной предварительной обработки (сороудаление, удаление песка, извлечение жиров).

Примечание Отстойник *Sédipac D* можно также применять в качестве установки **грязуудаления** для осветления воды, характеризующейся значительными колебаниями содержания ВВ, которое при пиковых нагрузках может достигать нескольких граммов на литр; в таких случаях на вход в отстойник следует подавать полимер с помощью статического смесителя.

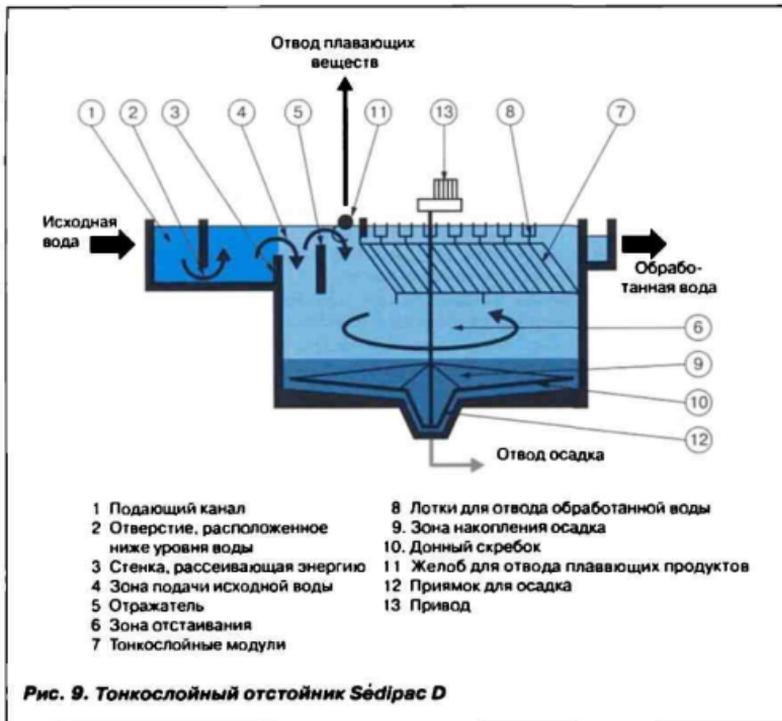
■ Принцип действия (рис. 9)

Исходная вода, поступающая в подающий канал (1), распределяется по всей ширине отстойника *Sédipac D* через серию отверстий (2), расположенных ниже уровня воды. Отстойник можно разделить на следующие зоны:

- подача исходной воды (4);
- удаление плавающих веществ с помощью желобов (11);
- отстаивание (6); зона имеет квадратное сечение,
- осветление на тонкослойных модулях (7), обеспечивающих тонкое осветление,
- отвод обработанной воды с помощью снабженных перегородками лотков (8) (защищены патентом),
- накопление осадка (9), сгущение осадка осуществляется скребком (10), снабженным приводом (13). Степень сгущения осадка зависит от времени его пребывания на дне аппарата и от способа его извлечения,
- центральный или периферийный отвод осадка (в зависимости от диаметра отстойника)

■ Преимущества

- **Доказавший свою работоспособность тонкослойный отстойник** [принцип действия и способ реализации аналогичны тем, что использованы в отстойнике *Densadeg* (см п. 3.5), имеющем более 300 практических внедрений], сохра-



обладающий отличными рабочими характеристиками вплоть до скорости воды 20 м/ч в расчете на площадь зоны тонкослойного отстаивания, что соответствует скорости 12 м/ч в расчете на полную площадь отстойника.

— Уменьшенные габариты: при равной производительности отстойник **Sédipac D** практически втрое меньше традиционного первичного отстойника нетонкослойной конструкции, о чем свидетельствуют сравнительные данные о поверхностных гидравлических нагрузках (табл. 2).

Таблица 2

	Пик сухого сезона, $\text{м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$	Максимальный расход, $\text{м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$
Традиционный отстойник	≤ 2	≤ 4
Отстойник Sédipac D	≤ 6	≤ 12

3.2.2.2. Отстойник Sédipac 3D

■ Принцип действия

Конструкция отстойника **Sédipac 3D** разрабатывалась в целях объединения в одном аппарате функций трех установок: песколовки (**Dessableur**), жироловки (**Degraisseur**) и первичного отстойника (**Decanteur**). Это позволило значительно уменьшить общий объем сооружений на стадии предварительной обработки (имеются в виду собственно очистные установки и связывающие их коммуникации) и сгруппировать в рамках одной зоны очистных сооружений все источники формирования отходов (песок, жир, первичный осадок), упростив тем самым решение задачи укрытия и дезодорации этих сооружений.

Отстойник **Sédipac 3D** позволяет удалять:

- до 90 % песка с размерами частиц 200 мкм;
- до 15 % экстрагируемых гексаном веществ, что составляет около 90 % плавающих, застывших, не эмульгированных в воде жиров ГСВ (см также гл. 9, п 4 2.5),
- до 75 % взвешенных веществ

Функционирование отстойника не сводится к простому последовательному осуществлению трех перечисленных выше функций, напротив, его отличительная черта заключается в том, что в нем одновременно происходит:

- **разложение каждой функции** на элементарные процессы в целях улучшения рабочих характеристик,
- **объединение части этих гидравлически совместимых функций**, за счет чего он более компактен (примерно на 20 %) и более прост в эксплуатации.

■ Описание конструкции (рис. 10)

- Зона удаления песка (1), где производится очистка поверхности частиц песка, седиментация и накопление песка происходят под зонами (1) и (2)

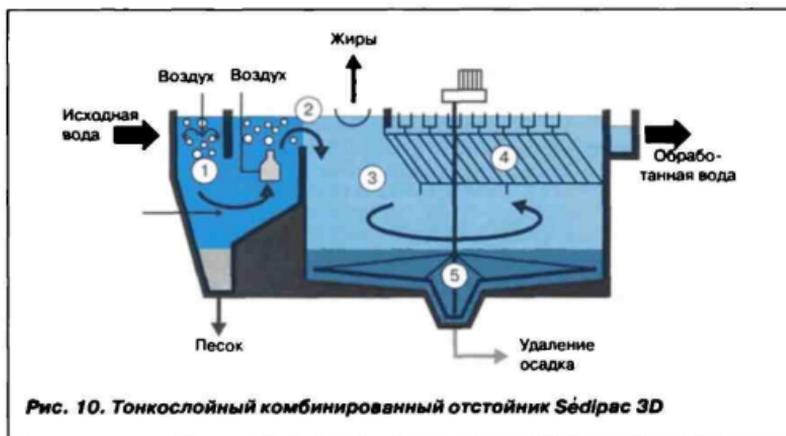


Рис. 10. Тонкослойный комбинированный отстойник Sédipac 3D

- Зона флотации жиров (2), где реализуется процесс формирования и перемешивания мелких пузырьков, накопление и отвод плавающих продуктов осуществляются в зонах (2) и (3)
- Зона тонкослойного отстаивания (4), в которой реализуются процесс отделения веществ, отстаивающихся в тонкослойных модулях, сбор и удаление скопившегося осадка производятся в зонах (4) и (5), степень сгущения осадка зависит от способа его удаления.
- Жироловка встроена в верхнюю часть песколовки и отстойника, поэтому удельная поверхность, занимаемая жироловкой, равна нулю; в результате площадь, занимаемая отстойником **Sédipac 3D** на производственной площадке
 - в 3–4 раза меньше площади, необходимой при использовании традиционного технического решения (песколовка-жироловка и статический отстойник),
 - примерно на 20 % меньше по сравнению с сооружением, включающим песколовку-жироловку и отстойник **Sédipac D**

■ Преимущества

Высокая эффективность отстойника **Sédipac 3D** объясняется следующими факторами.

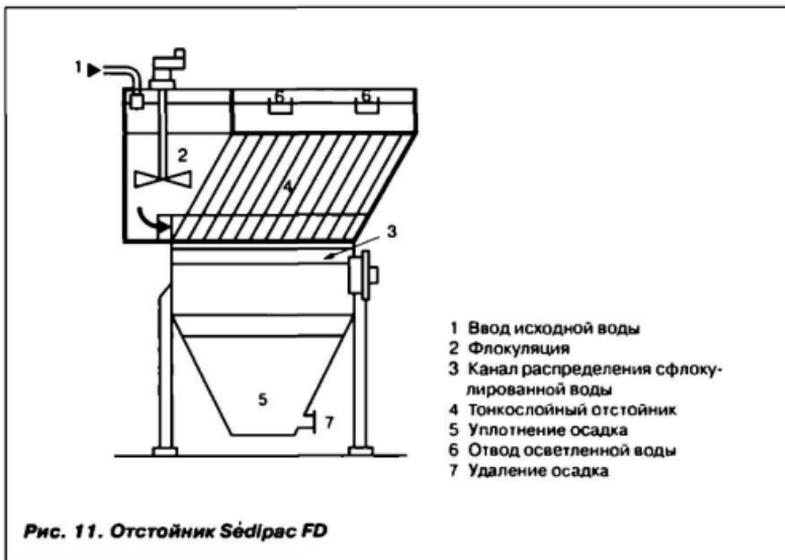
- отделение песка при скорости потока воды до 40 м/ч,
- высокоэффективная жироловка оригинальной конструкции с реактором-смесителем и зоной отделения жиров, отличающаяся максимальным снижением турбулентности на входе и на выходе, а также наличием поверхностного потока, сметающего всплывающие вещества без их разрушения к вращающемуся ковшу, из которого они отводятся,
- тонкослойная конструкция отстойника, отлично зарекомендовавшая себя в практической эксплуатации (см. п. 3.2.2.1),
- простота встраивания в очистные сооружения за счет прямоугольной формы и отсутствия каналов, связывающих зоны удаления песка и жира и зону отстаивания,
- простота дезодорирования за счет удобства размещения общего перекрытия над единым комплексом этого сооружения

3.2.3. Тонкослойный отстойник с флокуляцией **Sédipac FD**

В отстойнике **Sédipac FD** (рис. 11) в одном корпусе объединены зона коагуляции-флокуляции (**Floculation**) и зона тонкослойного отстаивания (**Decantation**). В зависимости от расхода обрабатываемой воды зона отстаивания очищается (или не очищается) скребковым механизмом. Отстойник, в частности, применяется в компактных установках **UCD** (см. гл. 22, п. 4), что идеально подходит для простых водопроводных станций, сооружаемых в сельской местности. Его можно также использовать на станциях с более высокими расходами (до 450 м³/ч), особенно для обработки воды с нестабильной загрязненностью.

3.3. Отстойники со слоем осадка

Основной принцип действия отстойников со слоем осадка рассматривался в гл. 3, п. 3.4.2. В них осадок, образующийся в результате флокуляции, представляет собой взвешенную в воде массу, через которую в вертикальном направлении снизу вверх проходит предварительно скоагулированная вода, причем этот поток воды имеет регулярный и равномерный характер. В этом сформированном осадком «фи-



льтрующем слое» происходит флокуляция, а осветленная вода отводится из верхней части отстойника

При непрерывной подаче воды с постоянным расходом в нижнюю часть слоя осадка через определенное время можно наблюдать его постепенное уплотнение в некоторых зонах, в результате чего формируется компактная неоднородная масса взвешенного осадка, внутри которой вода формирует проходы для протекания. В таких условиях отсутствует эффективный контакт между водой, проходящей через слой, и осадком, который формирует этот слой.

Если же подача воды осуществляется в **пульсирующем режиме**, когда после кратковременной подачи с большим расходом следует период покоя, в течение которого вода поступает с невысоким расходом, вся масса осадка трансформируется в однородный концентрированный слой. При введении воды в отстойник восходящим потоком весь осадок увлекается вверх, а рассеивающаяся при этом энергия порождает турбулентность, которая разрушает образующиеся агломераты; но затем, в последующий период «покоя» (невысокий расход воды), осадок равномерно оседает в таком же режиме, как это происходит в лабораторных цилиндрах

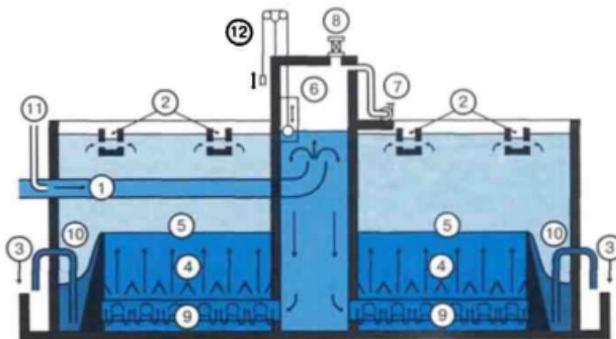
Подобный опыт можно выполнить в лаборатории, чтобы установить предельную скорость восходящего потока, действию которого может быть подвергнут слой осадка. В этом и заключается измерение **коэффициента когезии осадка К** (см гл. 5, п. 4.1.2.3). Величина предельной скорости зависит от множества факторов происхождения обрабатываемой воды, интенсивности обработки коагулянтom и флокулянтom, температуры, интервалов времени между введением различных реагентов и т. п.

3.3.1. Отстойник Pulsator

Отстойник **Pulsator**, разработанный более 50 лет тому назад, до сих пор остается наиболее часто применяемым при обработке природных вод. Такой успех обусловлен следующими его преимуществами:

- простота конструкции и адаптируемость к резервуарам любой формы;
- более высокая скорость Хазена по сравнению с таковой в статических отстойниках: при осветлении природных вод она достигает 2–4 м/ч (при благоприятных значениях коэффициента коагуляции осадка этот показатель может быть еще выше); данное преимущество в сочетании с отсутствием отдельного флокулятора (напомним, что зоны флокуляции и отстаивания в описываемом отстойнике совмещены) обеспечивает возможность создания исключительно компактных сооружений;
- эксплуатационная гибкость: быстрота запуска, незначительное влияние изменений расхода и/или качества обрабатываемой воды (инерционность слоя осадка);
- высокая надежность, обуславливаемая в первую очередь тем, что в отстойнике нет механического оборудования (устройств перемешивания, скребковых механизмов и т. п.), погруженного в воду или в осадок;
- низкие эксплуатационные расходы (малое потребление электроэнергии, оптимизация расхода реагентов и т. п.)

Собственно отстойник (рис. 12) состоит из резервуара с плоским дном, в нижней его части размещена система перфорированных труб (9), над которыми уста-



- | | |
|--------------------------|---|
| 1 Поддача исходной воды | 7 Вакуумный насос или вентилятор |
| 2 Отвод осветленной воды | 8 Автоматический клапан сброса разрежения |
| 3 Удаление осадка | 9 Перфорированные трубы распределения исходной воды |
| 4 Гасители напора | 10 Камеры уплотнения осадка |
| 5 Верхний уровень осадка | 11 Введение реагентов |
| 6 Камера разрежения | 12 Поплавковый переключатель |

Рис. 12. Отстойник *Sédipac FD*

новлены гасители напора (4); такая схема обеспечивает равномерную подачу воды по всему поперечному сечению аппарата (в плане). Другая система, образованная в верхней части аппарата перфорированными трубами или лотками (2), обеспечивает равномерный отбор осветленной воды. Подобная система подачи и распределения исходной воды позволяет поддерживать равномерный ее поток во всех зонах слоя взвешенного осадка и предотвращает опасность возникновения застойных участков.

Наиболее экономичный способ обеспечения подачи исходной воды в нижний коллектор отстойника в пульсирующем режиме — построить в отстойник промежуточную камеру (6), в верхней части которой создается разрежение с помощью вентилятора или компрессора, работающего в режиме вакуумного насоса (7) и откачивающего воздух с расходом, практически равным половине максимального расхода обрабатываемой воды.

В таких условиях уровень исходной воды в этой камере постепенно поднимается. По достижении высоты, которая на 0,6–1,0 м превышает уровень воды в отстойнике, электрическое реле, подключенное к датчику уровня [поплачковый переключатель (12) или электрод], автоматически открывает клапан сброса разрежения (8), соединяя камеру с атмосферой. При этом вода с большой скоростью устремляется в отстойник, а гасители напора обеспечивают нормальное распределение воды по сечению аппарата.

Отстойники *Pulsator* настраивают таким образом, чтобы импульс потока воды при сбросе разрежения длился 7–15 с, тогда как заполнение промежуточной камеры должно осуществляться в течение 30–40 с; при необходимости частоту и продолжительность этих пульсаций можно легко отрегулировать.

В результате пульсаций слою осадка сообщается возвратно-поступательное движение в вертикальной плоскости, приводящее к увеличению его объема за счет флокулированных ВВ, содержащихся в исходной воде и захваченных массой су-



Фото 11. Станция питьевой воды «Morton Jaffray» в Хараре, Зимбабве (9 отстойников *Pulsator*, 1850 м²)

существующего осадка. Для поддержания постоянного уровня осадка (5) в отстойнике предусмотрены боковые зоны (10) в виде углублений с наклонным дном, в которые переливается избыток осадка для уплотнения и последующего извлечения. Удаление уплотненного осадка производится периодически (реле времени) по отводным трубам (3). Важное преимущество такой конструкции состоит в том, что в случае удаления слишком большого количества осадка происходящая при этом определенная потеря воды никоим образом не оказывает влияния на сформировавшийся слой осадка.

Отстойник **Pulsator** легко монтируется в уже существующем резервуаре (от статического отстойника, бывшего фильтра и т.п.). Это позволяет выполнять реконструкцию имеющихся сооружений, увеличивая примерно в 2–3 раза производительность отстаивания. Такая модернизация была проведена, например, на водопроводных станциях в Буэнос-Айресе, Аргентина (производительность 864 000 м³/сут), в Александрии, Египет (производительность 240 000 м³/сут), и других странах.

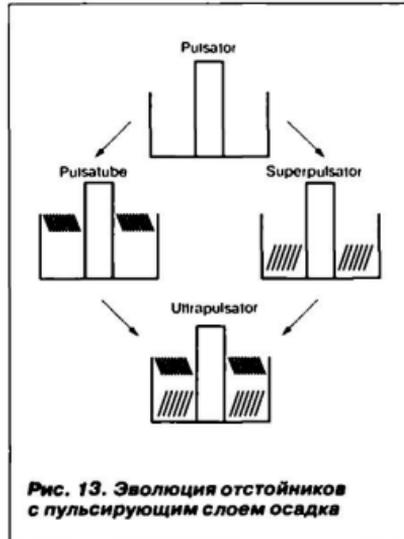


Рис. 13. Эволюция отстойников с пульсирующим слоем осадка

3.3.2. Комбинация с тонкослойным отстаиванием

Сочетать технологию отстаивания в контакте с осадком с тонкослойным отстаиванием можно двумя способами (см. также гл. 3, п. 3.4.3)

- или добавив тонкослойные модули (шестигранные трубки, см. гл. 3, п. 3.3.3, и гл. 10, п. 3.2.1) в зону осветленной воды, соответствующий аппарат носит название **Pulsatube** (или **Pulsator T**);

- или установив наклонные пластины непосредственно в слое осадка такой аппарат называется **Superpulsator** (или **Pulsator S**).

Одновременно оба подхода компания «Дегремон» реализовала в отстойнике **Ultrapulsator** (или **Pulsator U**), на рис. 13 схематически представлена эволюция этого семейства отстойников.

В таких отстойниках объединены все преимущества соответствующих технологий: отстаивание в контакте с осадком, пульсация слоя осадка и тонкослойное отстаивание (влияние на скорость Хазена и процесс уплотнения слоя осадка). Они имеют ряд общих элементов (подвод и распределение исходной воды, отвод обработанной воды) с отстойником **Pulsator** и превосходят его по важным техническим параметрам (допустимая скорость, качество осветленной воды и т.п.), сохраняя при этом присущие отстойнику **Pulsator** компактность, гибкость в эксплуатации и надежность.

3.3.2.1. Отстойник Pulsatube (или Pulsator T)

На рис. 14 представлена принципиальная схема отстойника **Pulsatube** (см. также фото 12 и 13), из которой можно понять следующее

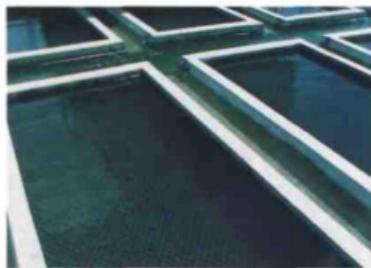


Фото 12. Восемь отстойников Pulsatube на станции питьевой воды «Kota Tinggi», Сингапур. Производительность 450 000 м³/сут

— если скорость подачи воды превышает допустимую для данной величины коэффициента когезии осадка K и мелкие флокулы выносятся из слоя осадка восходящим потоком осветленной воды, то они перехватываются системой тонкослойных модулей (12), где резкое снижение скорости Хазена обеспечивает их осаждение и возвращение в слой осадка. В слое осадка эти флокулы скользят по стенкам модулей, что приводит к их частичному обезвоживанию и превращению в более плотные, крупные и слипаемые частицы. За счет такого «обогащения» слой осадка может выдерживать более высокие восходящие скорости потока воды,

— сочетание этого эффекта с процессом доочистки осветленной воды на тонкослойных модулях позволяет работать при скорости восходящего потока, примерно вдвое превышающей эту же скорость в классическом отстойнике **Pulsator** (на практике от 4 до 9 м/ч)

Для преобразования в целях увеличения производительности существующего отстойника **Pulsator** в отстойник **Pulsatube** иногда требуется изменить системы распределения исходной и/или осветленной воды (из-за повышения скорости воды и потери напора, опасности перелива и т. п.)

3.3.2.2. Отстойник Superpulsator (или Pulsator S)

В отстойнике **Superpulsator** (рис. 15) применяется принцип флокуляции–отстаивания, реализуемый в условиях совместного действия наклонных пластин и слоя осадка (см. гл. 3, п. 3.4.3). Пластины, погруженные в слой осадка, способствуют хорошему распределению воды, так что необходимо в гасителях напора потока вводимой воды, как правило, отпадает

В отстойнике **Superpulsator** используются два явления, имеющих место одновременно

— в процессе флокуляции вода поступает в систему параллельных пластин, установленных под углом 60° к горизонтали. Нижняя поверхность каждой пластины оснащена отражателями, которые создают вихревые потоки, способствующие процессу флокуляции (фото 14),

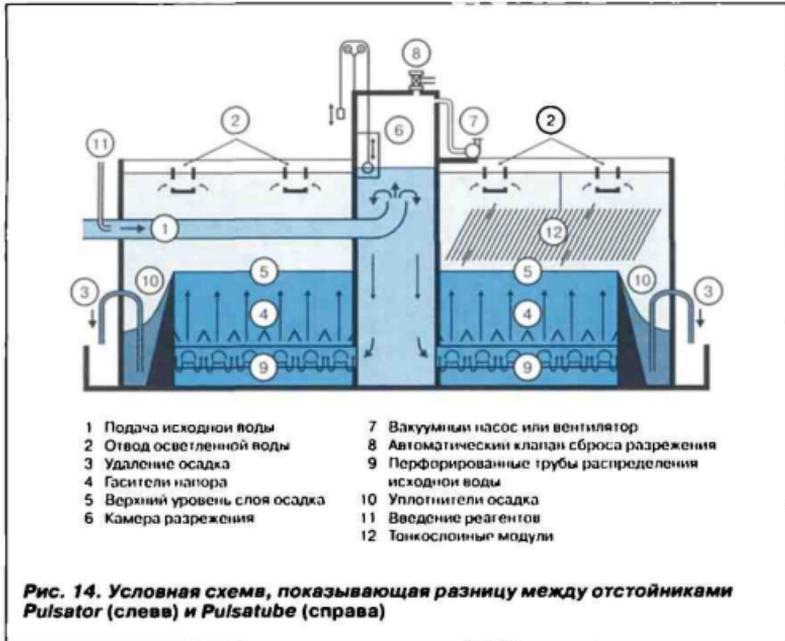


Фото 13. Шесть отстойников Pulsatube на станции питьевой воды «Sélangor», Малайзия. Производительность 1 040 000 м³/сут

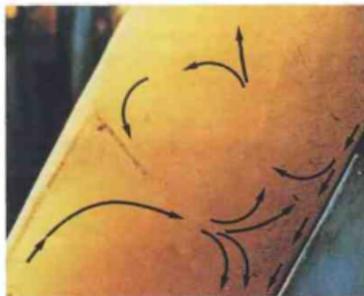


Фото 14. Циркуляция осадка между пластинами в отстойнике Superpulsator

— одновременно пластины позволяют поддерживать концентрацию слоя осадка на уровне, вдвое превышающем таковую в отстойнике Pulsator, работающем при той же скорости

Благодаря сочетанию этих двух эффектов в отстойнике Superpulsator можно вдвое увеличить допустимую скорость по сравнению с классическим отстойником Pulsator — от 4 до 8 м/ч (что приближает его к отстойнику Pulsatube, который, правда, работает более стабильно в условиях интенсивного внешнего солнечного освещения и/или значительных колебаний температуры)

3.3.2.3. Отстойник Ultrapulsator (или Pulsator U)

Вышеизложенные рассуждения позволяют понять, что, сочетая два технических решения, а именно

- применение наклонных пластин в слое осадка,
- применение тонкослойных модулей над слоем осадка,

можно еще более повысить эффективность отстаивания. В отстойнике Ultrapulsator, разработанном на основе этих принципов, допускается скорость восходящего потока по меньшей мере втрое выше скорости в классическом отстойнике Pulsator, т. е., как правило, от 9 до 12 м/ч

Отстойник Ultrapulsator особенно эффективен:

- для обеспечения простоты эксплуатации сооружения при минимальной занимаемой площади,



Фото 15. Станция питьевой воды в Бурлингтоне, штат Вирджиния, США. Производительность 36 000 м³/сут. Размещение двух отстойников Superpulsator в существующих резервуарах

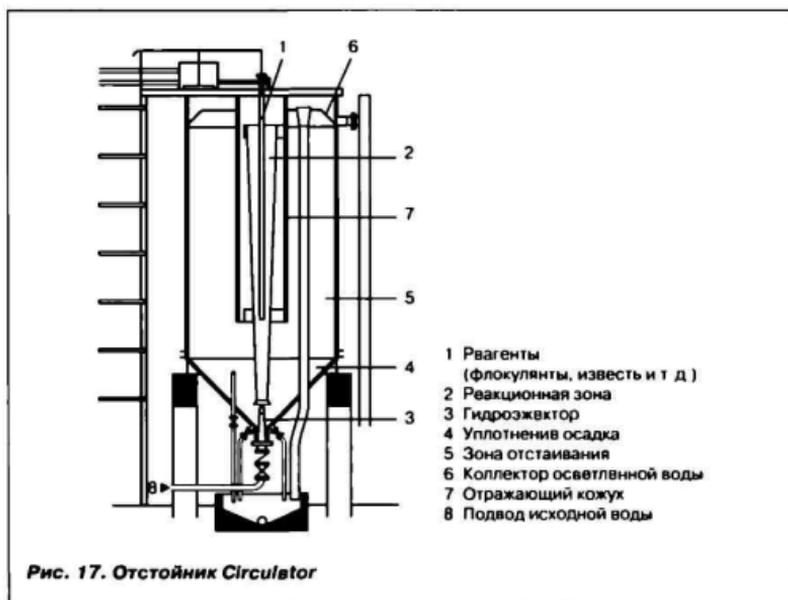
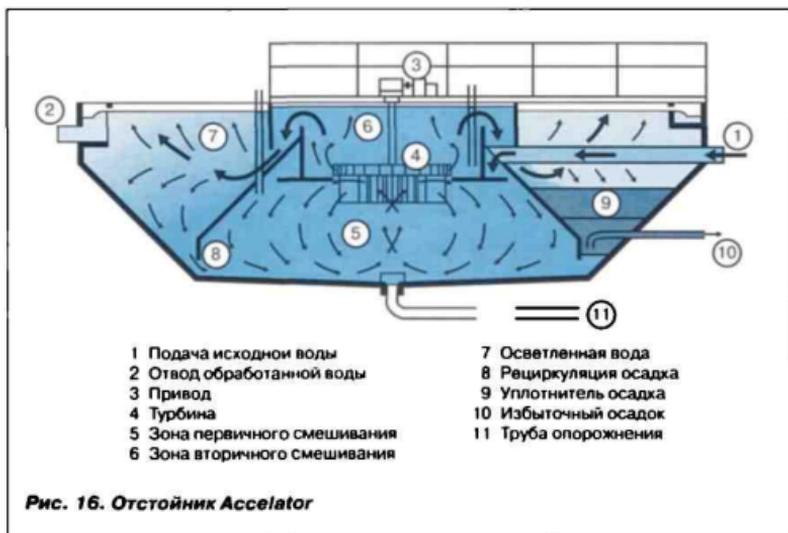
— при решении особых проблем обработки природных вод (например, маломутных высокоцветных вод с низкой температурой, что характерно для Канады, северных штатов США и России, на стадии предварительной обработки перед мембранами ультрафильтрации)

3.3.3. Область применения

Описываемые отстойники со слоем осадка способны осуществлять осветление любой природной воды, мутность и содержание взвешенных веществ в которой не превышают 1500 NTU и 2 г/л соответственно (в противном случае следует проводить надлежащую предварительную обработку, например удаление песка или грязеудаление), а также прекрасно справляются с удалением планктонных микроводорослей (при их содержании до нескольких сотен тысяч единиц на 1 мл), снижением цветности и извлечением глинистых коллоидов

Более того, поскольку концентрация осадка и время контакта в слое осадка особенно велики, эти отстойники хорошо подходят для обработки загрязненной воды с использованием порошкового активированного угля (ПАУ), поскольку сорбционная способность ПАУ в этом случае практически равна теоретическому значению (см изотермы Фрейндлиха в гл 3, п 10 1, и гл 5, п 7 2 2), и для снижения содержания как органических веществ (ОВ), так и микрозагрязнений требуются меньшие дозы ПАУ, чем в традиционных отстойниках. В тех случаях, когда загрязнения носят временный характер, можно даже отказаться от установки блока фильтров с гранулированным активированным углем (ГАУ)

Отстойники всего семейства **Pulsator** благодаря их многочисленным преимуществам работают в настоящее время в составе водопроводных станций, снабжающих питьевой водой примерно **полмиллиарда потребителей** в населенных пун-



ктах самых разных масштабов, в том числе около 50 столичных городов, а также множество промышленных центров ежечасно по всему миру в отстойниках этого типа обрабатывается в общей сложности от 3 до 4 млн м³ воды

3.4. Отстойники с рециркуляцией осадка

В отстойниках этого типа осадок отделяют от осветленной воды в зоне отстаивания, после чего его возвращают в зону реакции и смешения, оборудованную средствами механического (*Accelerator*, *Turbocirculator*) или гидравлического (*Circulator*, *Thermocirculator*) перемешивания, в которой выделяется энергия, необходимая как для флокуляции, так и для рециркуляции осадка. Исходная вода, содержащая введенные реагенты, подается в эту же зону смешения.

Отстойники с рециркуляцией осадка применяют только для осветления воды или для осаждения различных солей (например, CaCO₃, CaSO₄, CaF₂ и т. д.) и металлов в форме гидроксидов [Fe(OH)₃, Mg(OH)₂, Cu(OH)₂ и т. д.]

3.4.1. Отстойник *Accelerator*

Отстойник *Accelerator* (рис. 16) — наиболее старая разработка аппаратов этого типа. Он имеет центральную реакционную зону (5)–(6), окруженную зоной отстаивания (7). Обе зоны сообщаются между собой сверху и снизу.

Турбина (4) в верхней части реакционной зоны обеспечивает циркуляцию воды в зону отстаивания. Осадок, скапливающийся в этой зоне, возвращается (8) в центральную зону. Происходящее при этом обогащение осадка позволяет осуществить быструю флокуляцию.

Для смешивания исходной воды с осадком и реагентами отстойник можно оборудовать придонной мешалкой. Кроме того, такое перемешивание предотвращает скопление тяжелых осадков, способных вызвать забивание. Один или несколько уплотнителей осадка (9) позволяют удалять его избыток в максимально концентрированной форме.

Отстойник модели *Accelerator IS* оснащен скребком в нижней части зоны отстаивания и применяется для декарбонатации известью, возможность увеличения диаметра отстойника позволяет использовать его в самых различных случаях.

3.4.2. Отстойник *Circulator*

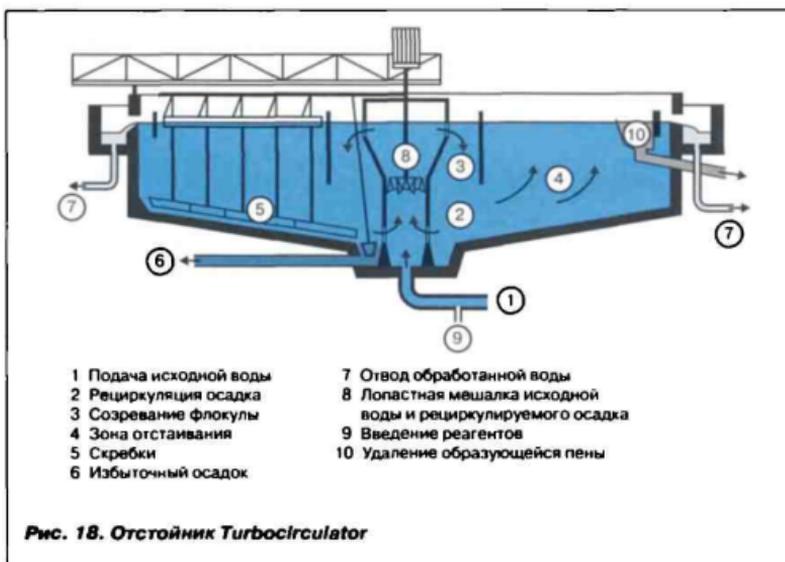
Отстойник *Circulator* (рис. 17) имеет простую конструкцию и прекрасно вписывается в сооружения малой и средней мощности. Гидроэжектор (3) обеспечивает рециркуляцию осадка и/или образовавшихся флокул, а также их смешение с реагентами и обрабатываемой водой в центральной реакционной зоне (2). Коническое днище отстойника облегчает соскальзывание осадка к эжектору. Таким образом, отстойник не содержит каких-либо движущихся механических частей.

Применяемый в основном для декарбонатации и умягчения известью, этот отстойник может использоваться также для флокуляции и отстаивания под давлением.

В режиме осветления скорость восходящего потока воды не должна превышать 2,5 м/ч, а в режиме чистого умягчения — 5–7 м/ч.

3.4.3. Отстойник *Turbocirculator*

В отстойнике *Turbocirculator* (рис. 18) рециркуляция флокул и/или образующегося осадка обеспечивается лопастной мешалкой (8) со специально рассчитанным профилем



Применение мешалки предотвращает разрушение хрупких осадков гидроксидов металлов, которые не выдерживают воздействия гидравлического эжектора, а также дает возможность использовать один и тот же аппарат как для осветления, так и для умягчения воды, допуская значительные колебания расхода и максимальную скорость потока, сравнимую по величине со скоростью в отстойниках **Circulator**

В реакционной зоне, расположенной в центре аппарата, управление процессами флокуляции и химическими реакциями осуществляется с помощью мешалки, скорость вращения которой можно регулировать в зависимости от устойчивости обра-

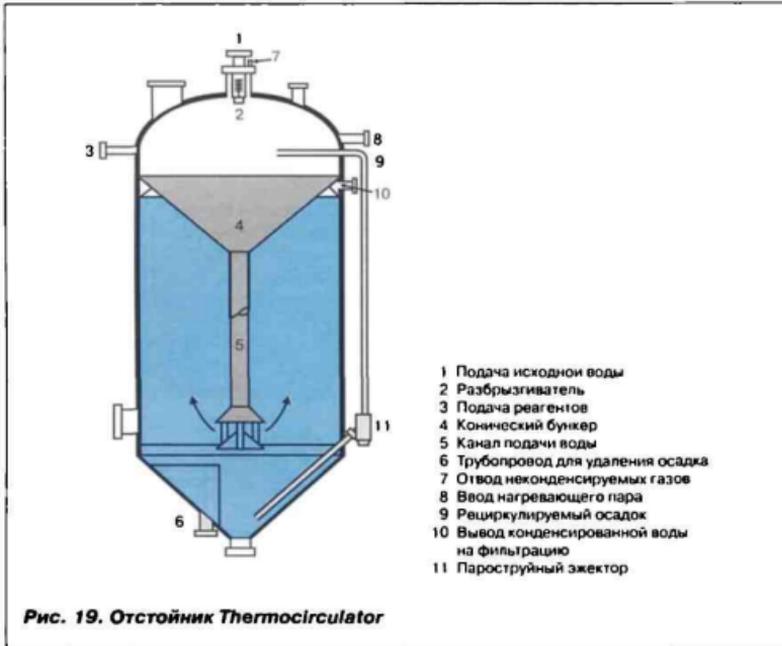


Фото 16. Отстойник Turbocirculator, диаметр 55 м. Первичное отстаивание сточных вод. Компания «James MacLaren Industries» (Канада)

зовавшихся флоккул, т е от вида обработки Скребок-овая система (5) постоянно сдвигает в центр днища осадок, который затем либо направляется в систему рециркуляции (2), либо поступает в накопители, откуда он периодически извлекается (6)

3.4.4. Отстойник *Thermocirculator*

Отстойник *Thermocirculator* (рис 19), являющийся разновидностью отстойника *Circulator*, применяют для обработки воды, исходно имеющей повышенную температуру (например, при декарбонатации известью в сочетании с обескремниванием магnezией), или для подпиточной воды некоторых котлов среднего давления Он позволяет также производить частичную дегазацию воды (кислорода)



Отметим, что при повышенных расходах применяют аппараты семейства *Densadeg*, а не отстойник *Thermocirculator*

3.5. Отстойник-уплотнитель с рециркуляцией осадка *Densadeg*

Отстойник *Densadeg* со встроенным уплотнителем и с внешней рециркуляцией осадка обеспечивает оптимальную флокуляцию и работает с использованием принци-

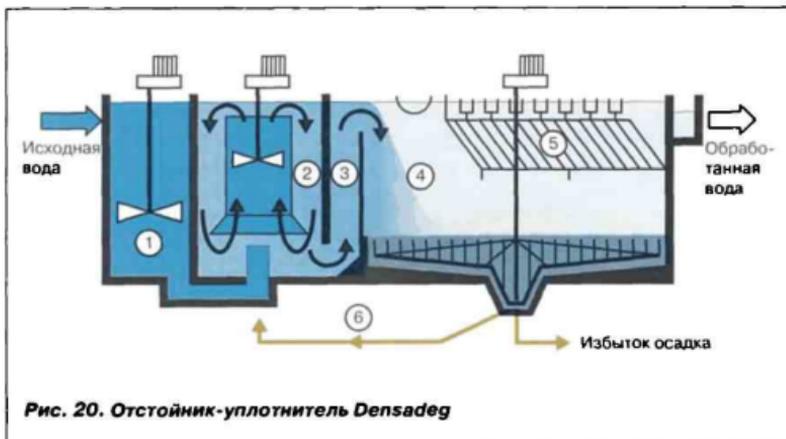


Рис. 20. Отстойник-уплотнитель *Densadeg*

на тонкослойного отстаивания. В его состав входят следующие элементы (рис. 20): быстрый смеситель (1), флокулятор с перемешиванием (2); флокулятор с поршневым потоком (3), резервуар-отстойник (4) (около 90 % флоккул подвергаются в нем отстаиванию и уплотнению и не поднимаются в зону тонкослойного отстаивания), тонкослойный модуль с перегородками (5), над которым установлены зубчатые отводные лотки, система возврата уплотненного осадка на вход в отстойник (6).

3.5.1. Принцип действия

■ Отстаивание с рециркуляцией осадка

Сконцентрированный осадок небольшим расходом возвращают в цикл обработки воды с помощью насоса с эксцентрическим ротором (чтобы не разрушить образовавшиеся флокулы), как уже говорилось, за счет рециркулированного осадка увеличивается площадь контакта и ускоряется процесс агломерации флокул. Флокуляция в аппарате *Densadeg* оптимальна при условии, что сформировавшиеся флокулы осадка занимают около 10 % пространства внутри флокулятора с перемешиванием.

■ Оптимизированная конструкция системы флокуляции

Флокулятор отстойника *Densadeg*, имеющий два последовательно установленных реактора (высокоскоростной с перемешиванием и низкоскоростной с поршневым потоком), уже был описан в п. 2.3 настоящей главы.

■ Тонкослойный отстойник-уплотнитель

В отстойнике-уплотнителе *Densadeg* происходят следующие процессы — отстаивание в поршневом потоке большей части осадка, которое происходит за счет значительного увеличения скорости отстаивания, что становится возможным благодаря размерам и в первую очередь плотности флокул, — доочистка в тонкослойных модулях. оставшиеся флокулы задерживаются тонкослойными модулями с системой распределения по потоку на выходе, благодаря чему скорость потока обрабатываемой воды не увеличивается (в противополо-

ложность системам распределения по входу) и флоккулы сохраняют свою целостность, кроме того, равномерность скоростей потока воды и флоккул исключает вероятность локального взмучивания осадка, так что осветленная вода имеет одинаковое качество на всей поверхности ее отвода.

— уплотнение осадка, производимое с помощью донного скребка с граблями, оно осуществляется гораздо быстрее благодаря повышенной плотности флоккул [нагрузка, выраженная в $\text{кг}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$, намного превышает соответствующий показатель, получаемый на более ранних моделях отстойников со слоем осадка]

■ Двойное введение электролита

Не так давно в аппарат **Densadeg** было внесено значительное усовершенствование — двойное введение полимера (защищено патентом) Полимер вносится в две зоны в реактор-флокулятор и в зону рециркуляции осадка

При равном потреблении полимера такое решение имеет целый ряд преимуществ

— флоккулы еще более уплотняются в результате «самоутяжеления» и становятся еще более устойчивыми к повышенным скоростям,

— увеличивается концентрация извлекаемого осадка В большинстве случаев она возрастает в 2 раза и превосходит по величине концентрации, характерные для статических отстойников Таким образом, благодаря специальному режиму введения полимера концентрация осадка, получаемого в отстойнике **Densadeg** при обработке слабо загрязненной поверхностной воды, возрастает от среднего показателя, равного 25 г/л, до 50 г/л и более (в обычном уплотнителе осадка эта величина составляет 25–30 г/л);

— за счет более рационального использования полимера забивающая способность осветленной воды существенно снижается, что при наличии последующего фильтрования значительно увеличивает продолжительность фильтроцикла

3.5.2. Преимущества отстойника-уплотнителя **Densadeg**

Densadeg — аппарат, испытанный на практике, и при его эксплуатации выявлен целый ряд преимуществ

— он обладает высоким быстродействием, что позволяет делать его более компактным по сравнению с другими отстойниками (табл. 3),

— достаточно гибок в эксплуатации и малочувствителен к изменениям качества и расхода обрабатываемой воды, поскольку концентрация твердой фазы в зоне флокуляции и главным образом зависит от рециркуляции уплотненного осадка и в меньшей степени — от сфлокулированных ВВ в обрабатываемой воде.

— позволяет достигать значительного снижения уровня загрязненности (особенно это касается мутности осветленной воды), что свидетельствует о высоком качестве работы реактора и выходных тонкослойных модулей и делает излишней установку последующих фильтров при обработке многих видов промышленных вод (например, подпиточная вода систем охлаждения). Во всех случаях сочетания осветления с химическим осаждением качество обработанной воды свидетельствует о превосходных результатах удаления тяжелых металлов, осаждение CaCO_3 , CaSO_4 , $2\text{H}_2\text{O}$, $\text{Fe}_2(\text{PO}_4)_3$ до практически равновесного состояния (см гл 25),

— вырабатывает концентрированный осадок ($> 30 \text{ г/л}$), который можно обезвоживать без применения промежуточных уплотнителей.

В табл 3 приведены значения некоторых показателей, получаемых в различных областях применения аппарата **Densadeg** (в зависимости от доз вводимых реагентов)

Таблица 3

	Осветление	Декарбонатация	Первичная обработка ГСВ	Третичная очистка ГСВ	Обработка ливневых вод	Обработка ПСВ
Максимальная скорость на тонкослойных модулях, м/ч	30	45	35	30	100	12–40
Концентрация извлекаемого осадка, г/л	30–100	200–700	30–100	25–50	30–100	30–500
Содержание ВВ в обработанной воде, г/м ³	< 5	< 5	< 20	< 5	< 50	< 10

Примечание Как уже отмечалось, во всех случаях концентрация извлеченного осадка близка к предельной (получаемой в лабораторных условиях), а при двойном введении полимера этот показатель даже превышает лабораторные результаты

3.5.3. Различные модели аппарата Densadeg (2D30, 4D30, 2D100)

Аппараты группы **Densadeg** предназначены для решения различных задач.

— осуществление наиболее эффективного осветления: **Densadeg 2D** или **2D30** (отстаивание–уплотнение). Аппарат **Densadeg 2D** имеет более 300 реализаций и является в настоящее время базовым для обработки воды любого типа, он обеспечивает максимальное удаление ВВ и снижение мутности,

— осуществление процессов, требующих очень высокой скорости обработки: аппараты **Densadeg 2D100** или **2D TGV**. Предназначены для обеспечения максимальной скорости отстаивания. Аппарат **Densadeg 2D TGV** наиболее пригоден для первичного отстаивания сбросов ливневых вод в общесплавных или раздельных сетях канализации, он позволяет производить отстаивание воды с очень высокой скоростью (до 100 м/ч), однако это достигается за счет увеличения расхода полимера и некоторого ухудшения качества осветленной воды (удаление около 85 % взвешенных веществ).

Как и в случае с отстойником **Sédipac**, компания «Дегремон» стремилась в обработке ГСВ создать систему, объединяющую в одном компактном сооружении функции предварительной и первичной физико-химической обработки. Аппарат **Densadeg 4D30** одновременно выполняет функции удаления песка и жиров, первичного отстаивания с высокой скоростью и уплотнения формирующегося осадка. В определенных ситуациях на данном аппарате возможно достижение более высоких скоростей отстаивания (до 100 м/ч), однако это предполагает внесение соответствующих изменений в его конструкцию, использование повышенных доз реагентов и т. п. (см. 2D100).

3.5.4. Области применения

В табл. 4 представлены основные области применения аппаратов группы **Densadeg** в зависимости от цели обработки воды

Таблица 4
Основные области применения аппаратов Densadeg

Назначение	Обработка	Цель обработки	Тип аппарата Densadeg
Производство питьевой и технической воды	Осветление	Удаление ВВ, микроводорослей, коллоидов, снижение цветности и т. д.	2D
	Декарбонатация	Удаление карбонатной жесткости	
	Обработка промывных вод фильтров и мембран (ультра- и микрофильтрация)	Удаление ВВ	
Очистка ГСВ и ПСВ	Первичное отстаивание с физико-химической обработкой	<ul style="list-style-type: none"> • Удаление ВВ, коллоидов и некоторой части растворенных макромолекулярных веществ перед стадией биологической очистки • Уплотнение образовавшихся осадков (> 50 г/л) 	2D, 2D TGV или 4D
	Третичная очистка	<ul style="list-style-type: none"> • Удаление остаточного фосфора • Удаление ВВ, оставшихся после осветления 	2D
	Удаление специфических соединений	Химическое осаждение анионов (карбонаты, сульфаты, фториды) или металлов (алюминий, железо, марганец, цинк, медь, никель и др.)	2D
	Обработка промывных вод биофильтров	Удаление ВВ	2D
Обработка ливневых вод (общеславная или раздельная система канализации)	Первичное отстаивание	<ul style="list-style-type: none"> • Удаление взвешенных веществ, коллоидов и металлов перед сбросом воды или ее обеззараживанием • Уплотнение образовавшихся осадков (> 50 г/л) 	2D TGV или 4D



Фото 17. «Bastrop Energy» (Остин, США). Отстойник Densadeg, используемый для осветления воды реки Колорадо для подачи в градирни и котлы высокого давления. Производительность 2500 галлонов в минуту (19 000 м³/сут); максимальная гидравлическая производительность 4000 галлонов в минуту (21 800 м³/сут)



Фото 18. «Pinal Creek» (Аризона, США). Обработка шахтных вод, содержащих растворенные металлы (Al, Cu, Fe, Mn, Ca), SO₄²⁻, CO₂. Две стадии (осветление с последующей декарбонизацией). Производительность 6500 галлонов в минуту (35 400 м³/сут)

Технологические линии обработки, описываемые в гл. 22, 23, 24 и 25, иллюстрируют различные области применения аппаратов этого семейства

3.6. Вторичные отстойники

Вторичные отстойники, часто называемые осветлителями, применяются в сооружениях с активным илом и предназначены для осаждения ила и его уплотнения до такой степени, чтобы при рециркуляции ила на входе в аэротенк концентрация биомассы поддерживалась на нужном уровне.

Особенности такого применения определяют специфику режима отвода осадка: рециркулируемый ил имеет значительный объем, а его биологическая природа требует хорошего управления временем его пребывания на дне отстойника для предотвращения опасности возникновения в нем нежелательных процессов в случае продолжительного отсутствия аэрации.

3.6.1. Выбор типа осветлителя

Выбор типа осветлителя в большей степени определяется чисто техническими требованиями, связанными с его размещением и величиной расхода обрабатываемых сточных вод, и в меньшей степени зависит от их происхождения и характера.

■ Радиальные или прямоугольные осветлители?

Преимущество осветлителей прямоугольной формы, часто размещаемых рядом, состоит в большей компактности сооружения и удобстве встраивания в имеющиеся здания. Однако, как правило, их стоимость выше стоимости радиальных осветлителей (если только не требуется перекрытия последних).

■ Отвод осадка с помощью скребкового механизма или с помощью отсасывающих систем?

Применение скребков — вполне экономичное решение для сооружений небольших размеров, в более крупных сооружениях для перемещения ила скребками с периферии к центральному приемку за короткое время необходим значительный уклон днища, а это влечет за собой увеличение глубины сооружения и усложнение сопутствующего оборудования.

В крупных сооружениях более целесообразен отвод ила посредством его отсасывания, так как при этом легко контролируется время пребывания ила в осветлителе, а глубина сооружения невелика, поскольку оно имеет горизонтальное днище. На практике, начиная с диаметра 25 м, осветлители обычно оснащают илососами. Отметим, что для осветлителей диаметром от 25 до 35 м компания «Дегремон» предлагает интересное компромиссное решение — отстойник **Racsuc** (см п 3 6 2 3).

■ Выбор материалов

Осветлители изготавливают из алюминия, нержавеющей стали, окрашенной или оцинкованной стали. Выбор конкретного материала зависит от характеристик обрабатываемой воды (в частности, от присутствия в ней хлоридов), экономических соображений и местных условий.

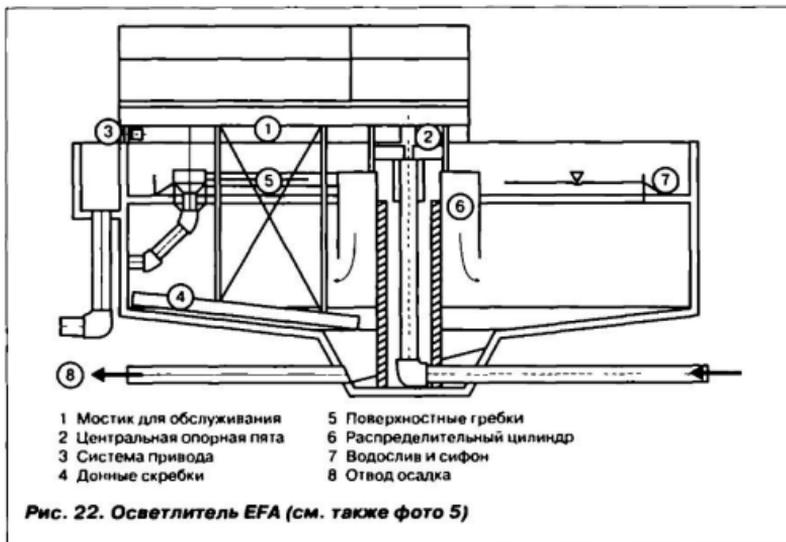
3.6.2. Радиальные осветлители компании «Дегремон»

Компанией «Дегремон» разработан широкий ряд радиальных осветлителей, покрывающий все потребности в них (рис. 21).



3.6.2.1. Радиальный осветлитель со скребковой системой (EFA)

Радиальный осветлитель со скребковой системой **EFA** оснащен радиальным передвижным мостиком, имеющим периферийный привод: нож скребка подвешен к несущей конструкции, образующей служебный мостик и вращающейся вокруг центральной оси резервуара (рис. 22). Мостик приводится в движение электродвигателем с редуктором, установленным на его периферийной части. Днище сооруже-



ния имеет уклон, а в центре дна оборудован приямок, в который ножом скребка перемещается скапливающийся ил

Мостик изготавливается из алюминия или нержавеющей стали, диаметр сооружения составляет от 6 до 25 м

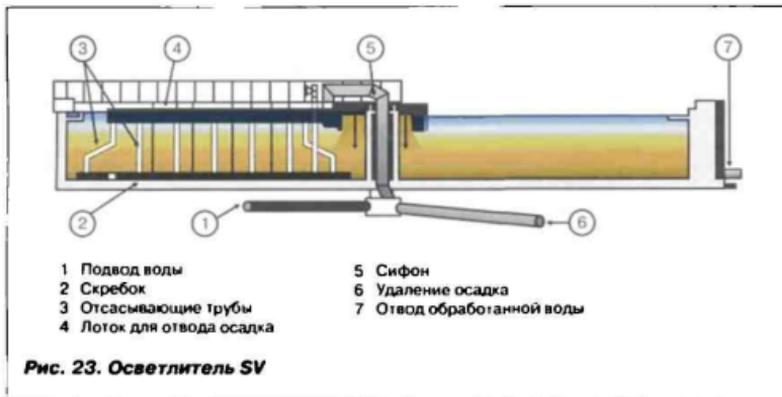
3.6.2.2. Радиальные осветители с отведением осадка илососами (SV, SD, Succir)

Донные скребки подвешивают и перемещают, как правило, с помощью треугольного рычага, который крепится к несущей конструкции, к скребкам подведены отсасывающие трубы, расстояние между которыми изменяется от центра к периферии сооружения. Эти трубы «впадают» в отводной лоток. Телескопическая манжета с регулируемым уровнем перелива, установленная в устье каждой трубы, позволяет осуществлять индивидуальный визуальный контроль расхода в каждой трубе. Может также предусматриваться подача воздуха в восходящий прямолинейный участок каждой из труб, которые в результате этого будут функционировать в режиме зрлифта

Удаление ила из движущегося бака в неподвижный отводящий трубопровод, встроенный в сооружение, осуществляется посредством сифона, оснащенного пусковым устройством. Эти сооружения могут также быть оборудованы поверхностными гребками для съема пены

■ Осветитель SV

Осветитель SV (от фр. *suction verticale* — вертикальный отсос) имеет илосос, который устанавливается на радиальном мостике с периферийным приводом и опорной плитой на центральной колонне, с притопленной наклонной балкой, выполняющей роль лотка для отвода ила (рис 23)



В осветлителях диаметром до 40 м всасывающие трубы устанавливают на радиальном отводном лотке, в сооружениях большего диаметра передвижной мостик удлиняют в продолжение радиуса (примерно на треть), формируя консоль. Это позволяет улучшить отвод осадка из центральной зоны (фото 19)

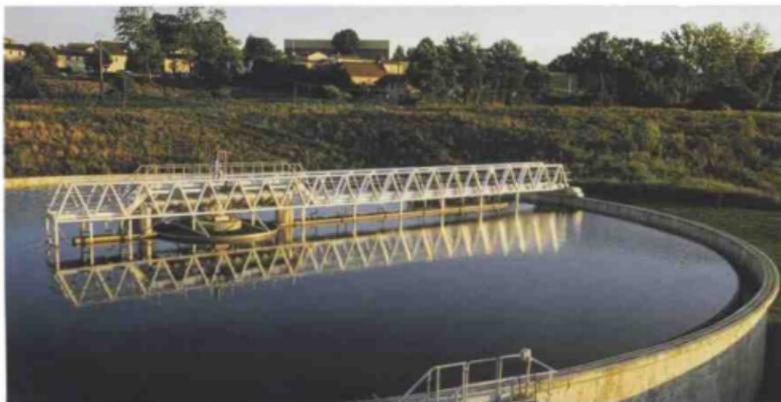


Фото 19. Осветлитель SV с консольным мостиком на очистных сооружениях в Лиможе, Франция. Производительность 120 000 м³/сут

Мостик изготавливается из алюминия, нержавеющей стали или из стали с защитным покрытием, диаметр сооружения составляет от 25 до 52 м

■ Осветлитель SD

В осветлителе **SD** (от фр. *suction diamétrale* — диаметальный отсос) совмещенный узел скребковой системы и илососа имеет радиальную конфигурацию и приво-

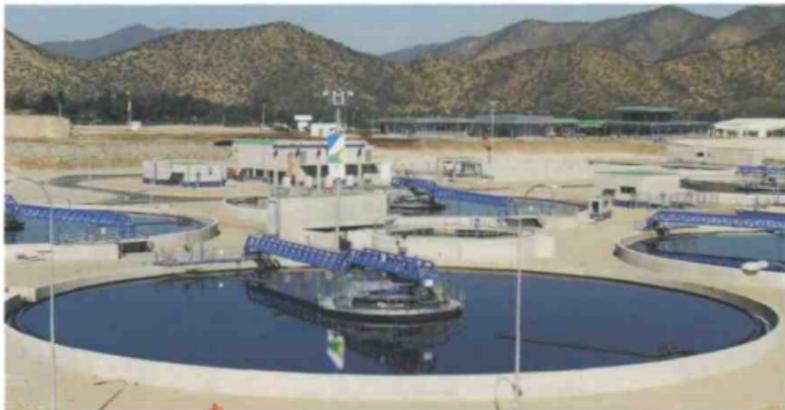


Фото 20. Осветлитель SD, диаметр 52 м. Очистные сооружения «La Farfana» (Сантьяго, Чили). Производительность 760 000 м³/сут

дится в движение центральным приводом, отводной лоток, имеющий форму окружности, также подвижен. Для отвода ила используется двойной сифон, который, как и служебный пешеходный мостик, устанавливается неподвижно.

Осветлитель типа **SD** наиболее приспособлен для обеспечения **непродолжительного времени пребывания ила** в сооружениях **большого диаметра**.

Мостик изготавливается из алюминия, нержавеющей стали или из стали с защитным покрытием, диаметр сооружения составляет от 40 до 60 м.

■ Осветлитель Succir

Осветлитель **Succir** с илососом имеет радиальный мостик с периферийным приводом. Большинство отсасывающих труб вращаются вместе с мостиком, рас-



Фото 21. Осветлитель Succir

положены по окружности, концентричной сооружению, на расстоянии, равном примерно $\frac{1}{3}$ радиуса остальные трубы устанавливаются в одну линию со скребком

Осветлители этого типа предназначены для более равномерного отвода ила из центральной зоны и наилучшим образом подходят для обработки осадков с низким иловым индексом

Мостик изготавливается из алюминия, нержавеющей стали или из стали с защитным покрытием, диаметр сооружения составляет от 30 до 52 м

3.6.2.3. Радиальные осветлители со скребковым механизмом и илососом (Racsuc)

Радиальные осветлители Racsuc со скребковым механизмом и илососом имеют радиальный мостик с периферийным приводом, отвод ила осуществляется скребковой системой в центральной зоне и илососом на периферии сооружения

Донная скребковая система перемещает ил из центральной зоны в приемок, ил, отсасываемый из периферийной зоны, также направляется в приемок по системе горизонтальных труб и подается в него с медленной скоростью по общей вертикальной трубе (фото 22)



Фото 22. Осветлитель Racsuc

Данный аппарат дополняет группы осветлителей со скребковыми или отсасывающими системами удаления ила, при этом в нем сохраняются как экономические преимущества сооружений I типа, так и непродолжительное время пребывания осадка, отличающее осветлители II типа

Мостик изготавливается из алюминия, нержавеющей стали или из стали с защитным покрытием, диаметр сооружения составляет от 20 до 40 м.

3.6.3. Прямоугольные осветлители SLG

Прямоугольная конфигурация в меньшей степени, чем радиальная, пригодна для строительства сооружений, имеющих очень большую единичную площадь. Особое



Фото 23. Прямоугольный осветлитель SLG. Очистные сооружения «Chelas», Португалия

внимание следует уделять должному равномерному распределению потока обрабатываемой воды на входе в сооружение и отводу осветленной воды, а также не допускать наличия неочищаемых скребком зон дна сооружения

Прямоугольные осветлители **SLG** (от фр *suction longitudinale grande* — продольный отсос для крупного осветлителя) являются отстойниками с горизонтальными потоком и днищем

Скребокная система закреплена на поперечном мостике, совершающем возвратно-поступательное движение в автоматическом режиме, на мостике установлены трубы для отсоса ила. Ил извлекают с помощью сифона, закрепленного на мостике и обеспечивающего перелив ила из приемка в боковой лоток (фото 23)

Такую конструкцию можно рекомендовать для сооружений, имеющих ширину до 20 м и длину до 70 м

3.7. Реактор Gyrgyz с гранулированной контактной массой

3.7.1. Принципы и условия применения

Отстойник **Gyrgyz** с флюидизированным (псевдооживленным) слоем, как правило, применяется для **декарбонатации** подземных вод, имеющих повышенную кальциево-карбонатную жесткость, подземные воды не содержат взвешенных веществ, а значит, не нуждаются в осветлении (в то же время последующее фильтрование необходимо)

От аппаратов, работающих с использованием способа осаждения в контакте с осадком (см пп 3 4 и 3 5), реактор **Gyrgyz** отличается возможностью создания центров кристаллизации гораздо больших размеров. В устройствах I типа размер

элементарных кристаллов карбоната кальция составляет около 0,01 мм, тогда как в реакторах **Gyrzuz** для кристаллизации применяется масса, состоящая преимущественно из зерен песка, имеющих исходный размер от 0,2 до 0,4 мм. Карбонат кальция осаждается и кристаллизуется на поверхности зерен, между которыми с большой скоростью просачивается восходящий поток воды, в результате чего происходит флюидизация слоя, обеспечивающая оптимальный обмен между жидкой и твердой фазами без опасности агломерации зерен, образующих этот слой. Значительная величина поверхности зерен способствует скорости и полноте реакции. По этой причине процесс иногда называют каталитической декарбонатацией.

Преимущества аппаратов **Gyrzuz**

- небольшая площадь занимаемой поверхности (но значительная высота сооружения),
- возможность функционирования под давлением; применение аппаратов **Gyrzuz** в сочетании с закрытыми фильтрами позволяет осуществлять декарбонатацию воды без изменения гидравлической нагрузки;
- формирование осадка в виде сферических гранул диаметром 1–2 мм, такой осадок быстро обезвоживается и может использоваться повторно (промышленность, сельское хозяйство)

Поскольку процесс декарбонатации в реакторе **Gyrzuz** представляет собой кристаллизацию карбоната кальция в форме кальцита (ромбодзры) при контакте с массой гранул, играющих роль центров кристаллизации, обрабатываемая вода не должна содержать каких-либо соединений, не осаждающихся в кристаллической форме. То есть аппарат непригоден для обработки воды с высоким содержанием коллоидов или железа. Кроме того, требуется предотвращать осаждение магнезии (хотя магний часто присутствует в подземных водах), так как она не кристаллизуется и даже ингибирует осаждение кальцита. Таким образом, необходимо:

- либо обеспечить превышение кальциевого титра γ_{Ca} исходной воды над полным щелочным титром ТАС,
- либо осуществлять лишь частичную декарбонатацию, когда доза извести или каустической соды, выраженная в французских градусах ($^{\circ}F$ — см. гл. 1, п. 4), не превышает желаемого значения γ_{Ca}

В обоих случаях необходимо также, чтобы магниевый титр T_{Mg} имел невысокое значение, что предотвратит помехи нормальному завершению реакции кристаллизации $CaCO_3$, которые могут быть созданы начинающимся соосаждением магнезии

Реактор **Gyrzuz** позволяет производить воду без карбонатов и с малым содержанием ВВ, причем появление последних преимущественно обусловливается наличием примесей в используемых реагентах. В то время, как каустическая сода не содержит каких-либо примесей, в коммерческой извести всегда присутствуют те или иные количества недожженного продукта. Для устранения проблемы плохого качества извести имеется эффективное, но дорогостоящее решение — установка сатуратора извести, вырабатывающего прозрачную известковую воду. При хорошем качестве извести достаточно установки выходных фильтров.

3.7.2. Описание

Реактор **Gyrzuz** (рис. 24) состоит из трех поставленных друг на друга металлических цилиндров, диаметр которых возрастает от основания к верхней части аппарата. Цилиндры соединены между собой промежуточными секциями, имеющими форму усеченного конуса.



Фото 24. Вид верхней части четырех из восьми реакторов Gyrasur. Ханнингфилд (Эссекс и Суффолк Уотер, Великобритания). Производительность 230 000 м³/сут

Принцип работы

- исходная вода подается горизонтально и тангенциально (1) в камеру смешения, создающийся восходящий спиралеобразный поток переводит во взвешенное состояние наиболее крупные частицы контактной массы, являющиеся центрами кристаллизации. Образовавшаяся суспензия классифицируется, как и любой псевдооживленный слой: мелкие, недавно введенные зерна остаются в верхней части слоя, а нарастившие наибольшую кристаллическую оболочку оседают на дно нижнего цилиндра, откуда их периодически извлекают (4),
 - известь (или каустическая сода) подается в камеру смешения в точке (3) (зона интенсивного перемешивания) в виде сильноразбавленного известкового молока или известковой воды (или в виде раствора соды),
 - обработанная вода, отделенная от контактной массы в верхнем цилиндре (7), собирается в верхней части аппарата и отводится в точке (2),
 - вследствие непрерывного укрупнения зерен и необходимости компенсировать потери, которые образуются в результате удаления из аппарата наиболее крупных из них, в точке (5) добавляют мелкие зерна
- Скорость потока в зоне разделения фаз (С) может достигать 30–90 м/ч. Семейство реакторов этого типа позволяет обрабатывать широкий диапазон расходов — от 50 до 2000 м³/ч. На фото 24 представлен вид верхней части четырех аппаратов Gyrgyz, обеспечивающих частичную декарбонатацию известью воды затрофного водоема после ее предварительного осветления в отстойниках Pulsator

3.8. Устройства для удаления осадка

3.8.1. Сбор осадка внутри отстойников

Во всех предшествующих описаниях отстойников обязательно уточнялось, имеются ли в них скребковые механизмы сбора осадка

В отстойниках **без скребкового механизма** под действием силы тяжести осадок накапливается в одном или нескольких приемных бункерах. Наклон стенок бункеров должен превышать величину естественного угла откоса осадка (от 40 до 70°)

В отстойниках **со скребковым механизмом** осадок, скапливающийся на их дне, перемещается в один или несколько приемков, конструкция которых предотвращает образование отложений. В некоторых аппаратах, например в прямоугольных отстойниках большой ширины, сами приемки также должны быть оборудованы скребковыми механизмами или шнеком, поскольку экономически нецелесообразно придавать им наклон, который был бы достаточным для самотечного отвода осадка.

Только отсасывающие системы позволяют производить сбор слабоконцентрированных осадков и илов без использования бункеров

3.8.2. Отвод осадка

Отвод осадка может осуществляться самотеком при условии, что имеющаяся нагрузка достаточна, а физические свойства осадка (вязкость, тиксотропность, текстура и т. д.) не препятствуют использованию этого способа. В остальных случаях осадок следует извлекать с помощью насосов

Удаление осадка обычно производят в периодическом режиме. Исключение составляют несколько особых случаев.

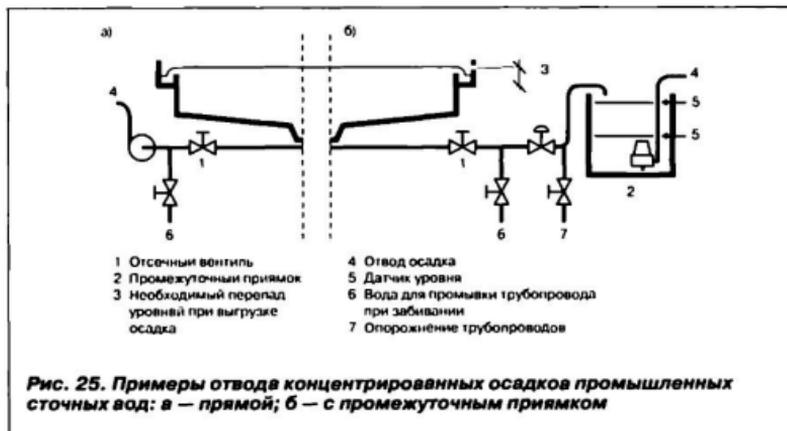
- внешняя рециркуляция,
- высокий уровень опасности забивания системы

3.8.3. Общие положения

Системы отвода осадка должны проектироваться таким образом, чтобы исключить любую опасность их забления. При этом следует руководствоваться следующими правилами, адаптируя их к различным типам аппаратов

- необходимо обеспечивать (по меньшей мере периодически) скорость, достаточную для предотвращения формирования отложений;
- нельзя устанавливать трубопроводы слишком маленького диаметра,
- по возможности нужно прокладывать трубопроводы прямолинейно,
- необходимо снижать длину всасывающих линий, ведущих к насосам.
- перфорированные трубы можно использовать лишь для отвода осадка на небольшие расстояния и при условии высокой его текучести,
- требуется предусматривать возможность опорожнения и промывки трубопроводов (водой и/или сжатым воздухом) и даже их механической прочистки (металлургия)

На рис. 25 представлены два примера устройств для отвода концентрированного осадка, образующегося при обработке промышленных сточных вод



- прямой отвод,
 - отвод с применением резервуара промежуточного хранения, это решение предоставляет возможность визуального контроля и допускает извлечение осадка из отстойника и удаление его из резервуара с разными расходами.
- В гл. 18, п. 8, содержатся рекомендации по осуществлению погрузочно-разгрузочных операций с осадками, в том числе с жидкими илами.

3.8.4. Автоматизация

Извлечение осадка практически всегда производится в периодическом режиме, поэтому немалый интерес представляет автоматизация данного процесса. В зависимости от назначения системы автоматического регулирования могут функционировать

- с применением реле времени частота/длительность (особенно при постоянном расходе и невысокой концентрации извлекаемого осадка),
- пропорционально расходу (изменение частоты операций извлечения осадка при их постоянной продолжительности),
- в зависимости от концентрации осадка (измеряемой ультразвуковым датчиком или оцениваемой исходя из усилия при работе скребка), при этом рекомендуется измерение уровня слоя осадка;
- исходя из уровня осадка в отстойнике (определяемого ультразвуковым или оптическим датчиком)

3.8.5. Плавающие продукты

Чаще всего продукты, плавающие на поверхности воды, необходимо отделять от осадка. Как правило, они направляются с помощью поверхностных гребков в бункер или лоток, соединенный с резервуаром, в котором подвергаются уплотнению. Часто рекомендуется установка устройств автоматической очистки соединительных трубопроводов.

4. Флотаторы

Как рассматривалось в гл. 3, п. 4, из всех методов разделения твердой и жидкой фаз (в данном случае флоккул и воды) именно флотация лучше всего подходит для отделения флоккул невысокой плотности, какие образуются, например

- при подготовке питьевой воды из вод, содержащих незначительные количества ВВ, но богатых склонными к коагуляции ОВ (гуминовые кислоты) или содержащих планктонные водоросли;



**Фото 25. Передвижная флотационная установка.
Производительность $10 \text{ м}^3/\text{ч}$**

— при обработке промышленных сточных вод, когда в последних присутствуют волокна, жиры, углеводороды, полимеры и т. д.;

— при обработке промышленных или городских сточных вод на стадии осветления и уплотнения активных илов

Кроме того, нельзя забывать два следующих важных условия

— помимо флокул гидрофобных ВВ, перечисленных выше (волокна, жиры, углеводороды и т. п.), с помощью флотации можно отделять лишь такие флокулы, которые были образованы до входа воды во флотатор;

— флокулы должны обладать способностью к соединению с таким количеством пузырьков (при хорошем перемешивании), которого будет достаточно, чтобы образовавшийся комплекс из воздуха и флокул приобрел надлежащую скорость всплывания

Для проверки выполнения второго условия необходимо предварительно провести лабораторные тестирования (Flotatest — см гл 5, п. 4.1.2.4) или пилотное испытание опытно-промышленного масштаба (фото 25).

4.1. Общее описание технологии

Флотаторы бывают радиальные и прямоугольные. Прямоугольная форма обычно предпочтительна для флотаторов, используемых в обработке больших расходов воды питьевого назначения — такая конфигурация позволяет объединить в блоке флокулятор, флотатор и фильтры при минимальной занимаемой площади.

По гидравлическим характеристикам радиальные флотаторы превосходят прямоугольные. Эти преимущества особенно ярко проявляются при обработке вод с высоким содержанием взвешенных веществ и при наличии достаточно прочных флокул и состоят в следующем

— при равной производительности в радиальном флотаторе расстояние между верхней частью камеры смешения (вода / пузырьки воздуха) и нижней частью перегородки сифона меньше (более вертикальный поток воды);

— практически на всем горизонтальном сечении флотатора может поддерживаться равномерное распределение пузырьков воздуха;

— более простой сбор гребками больших количеств плавающих продуктов

Однако при производстве питьевой воды забота о сохранности целостности хрупких флокул при их переносе из флокулятора во флотационную емкость все же вынуждает использовать флотаторы прямоугольной формы с примыкающим флокулятором.

4.1.1. Общее описание флотационной установки

Принцип действия флотатора, иллюстрируемый на рис. 26, одинаков как для радиальных, так и для прямоугольных установок.

Обрабатываемая вода (11), предварительно сфлокулированная реагентом (12) во флокуляторе (13), подается в камеру смешивания (1). Там она приводится в контакт с водой, насыщенной воздухом (или другим газом), из которой в результате снятия давления выделяются мельчайшие пузырьки воздуха. Создаваемые комплексы из флокул и пузырьков воздуха, плотность которых ниже плотности воды, отделяются в зоне (2) и скапливаются на поверхности. Плавающие продукты удаляют с помощью системы гребков (3) (можно также применять систему перелива), после чего удаляют по желобу (4). Осветленная вода отбирается с помощью сифонной пе-

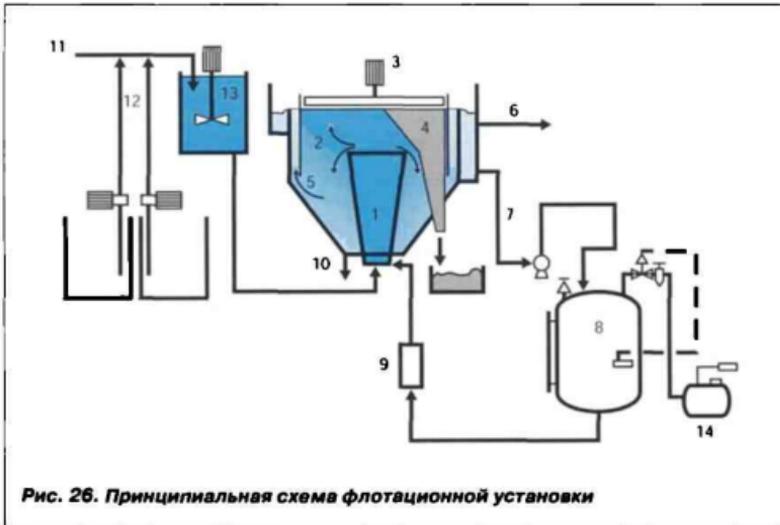


Рис. 26. Принципиальная схема флотационной установки

регородки (5) или более сложного устройства (см. п. 4.2.2.2), а затем выводится из флотатора в точке (6).

Насыщенную воздухом воду получают (см. также гл. 3, п. 4.3.1, рис. 35):

- **косвенным насыщением.** часть обработанной воды рециркулирует (7) и приводится в контакт со сжатым воздухом (14) в напорном баке (8);
- **или прямым насыщением.** вся обрабатываемая вода подается в напорный бак.

Насыщенная воздухом вода подается в камеру смешивания (1) сразу же после прохода через регулирующий вентиль (9) или непосредственно перед устройством снятия давления (форсункой).

В некоторых областях применения, а также когда флотатор имеет большой диаметр, его оснащают донным скребком, облегчающим удаление в точке (10) осадка, который может откладываться на дне флотатора.

Примечание. Камера смешивания имеет два назначения.

- введение обрабатываемой воды в контакт с водой, насыщенной воздухом;
- рассеивание кинетической энергии смеси перед ее подачей в зону разделения.

4.1.2. Напорные баки

Напорные баки, применяемые для растворения газа в воде (их также можно называть сосудами насыщения под давлением или сатураторами воды), в зависимости от назначения могут изготавливаться из стали с защитным покрытием или из нержавеющей стали и бывают вертикальными или горизонтальными.

Стандартные напорные баки, используемые компанией «Дегремон», характеризуются временем контакта несколько десятков секунд (максимум 1 мин) и имеют вертикальную форму при производительности до 300 м³/ч насыщенной воды.



В системе может применяться схема регулирования подачи воздуха (по принципу «все или ничего») или расхода воды. На рис. 27 представлен пример установки насыщения воды воздухом, нашедшей широкое распространение благодаря своей простоте.

4.1.3. Флотопродукты (сбор и удаление)

■ Удаление из флотаторов

Слой продуктов, плавающих на поверхности воды во флотаторе (флотопродукты), в некоторых случаях может достигать нескольких десятков сантиметров и при этом быть исключительно устойчивым (например, в случае уплотнения активных илов). Иногда толщина этого слоя невелика (несколько сантиметров), а сам он неустойчив (при флотации флокул гидроксидов металлов). Таким образом, система для сбора этого слоя должна соответствовать природе образующих его продуктов. Флотопродукты можно удалять из флотатора.

- переливом, чтобы облегчить отделение кекообразного слоя от стенок флотатора, их следует обрызгивать водой;
- с помощью гребков, число поверхностных гребков определяется скоростью их движения, расстоянием между соседними гребками, а также объемом удаляемого продукта. Нельзя допускать деаэрации или разрушения плавающего слоя в результате чрезмерного сжатия под действием гребков. Поэтому во флотаторах большого размера может потребоваться установка нескольких желобов, по которым флотопродукты отводятся с поверхности воды.

■ Удаление из бака-сборника

Перед удалением продуктов из бака-сборника откачкой с помощью насоса может потребоваться их деаэрация. Насосы должны быть всегда готовы к работе.

4.1.4. Перекрытие флотаторов

Поскольку флогопродукты плавают на поверхности воды, их требуется защищать от дождей (а также от ветра), которые могут разрушить плавающий слой и частично перевести его во взвешенное состояние.

4.2. Флотаторы осветления

Все флотаторы осветления работают по принципу **косвенного насыщения**.

4.2.1. Радиальные флотаторы

Компанией «Дегремон» применяются радиальные флотаторы двух вариантов: металлическая конструкция (**Flotazur BR**), стандартизуемая до диаметра 8 м (рис. 28), либо бетонное сооружение, стандартизуемое до диаметра 20 м (фото 26).

Радиальные флотаторы оснащаются донными и поверхностными скребками. В зависимости от назначения скорость флотации варьируется от 2 до 10 м/ч, а доля

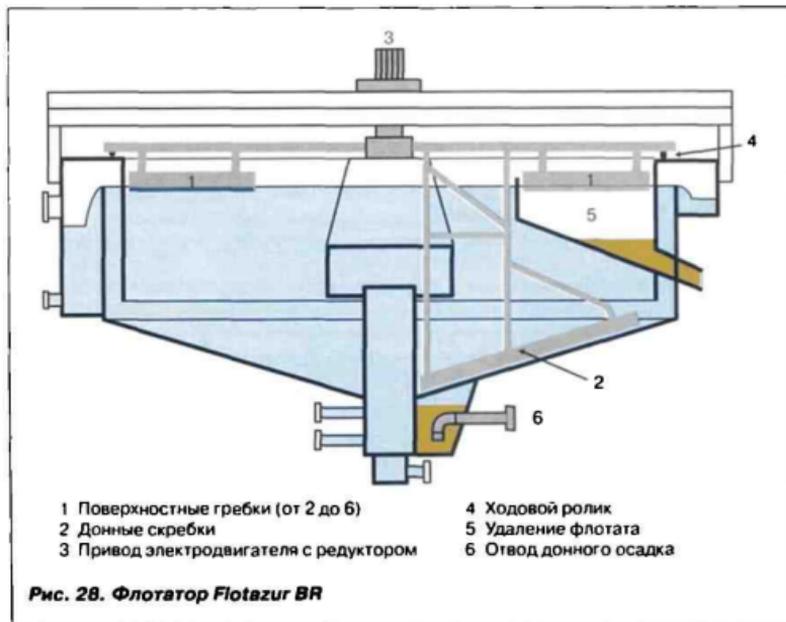




Фото 26. Флотационная установка «Вагганса Вергеја» (Колумбия) для компании «Есоретрол». Производительность 72 000 м³/сут. Флотация нефтесодержащих вод. Четыре аппарата Sediflotazur диаметром 15 м

рециркулируемой насыщенной воздухом воды составляет от 15 до 60 %. Число скребковых элементов и отводных лотков устанавливается в зависимости от объема удаляемых флотопродуктов

4.2.2. Прямоугольные флотаторы

4.2.2.1. Флотатор Flotazur P (традиционного типа)

Флотатор Flotazur P (рис. 29) является комбинацией флокулятора (1) и флотатора (2) прямоугольной формы и наиболее приспособлен для обработки воды с невысоким содержанием ВВ, формирующих легкие и непрочные флокулы. Скорость разделения фаз составляет от 6 до 12 м/ч, доля рециркулируемой насыщенной воздухом воды варьируется от 6 до 12 %

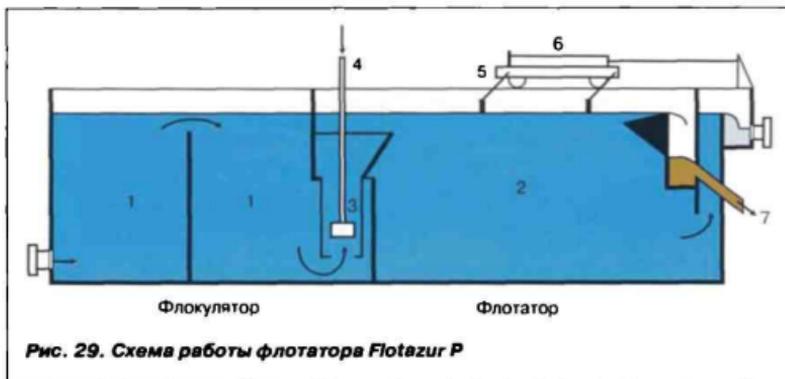


Рис. 29. Схема работы флотатора Flotazur P

После пребывания в течение 15–30 мин во флокуляторе, оснащенном низкоскоростным перемешивающим устройством, вода поступает

- либо в камеры смешения (3), размещенные параллельно,
- либо в зону размещения системы форсунок, где она вводится в контакт с насыщенной воздухом водой (4). Плавающие продукты с противоположного конца (7) флотатора удаляют с помощью гребков. Они установлены на подвижном мостике (5), возвратно-поступательное движение которого позволяет очистить от «пены» часть бассейна, где происходит уплотнение плавающего слоя (от трети до половины длины резервуара) без возмущения зоны расширения слоя над камерами смешения. В зависимости от размеров флотатора мостик может приводиться в движение винтовым домкратом (6) или электродвигателем.

Конструкция флотаторов стандартизована на площадь флотации до 120 м², и обычно они не оснащаются донными скребками.

4.2.2.2. Высокоскоростные прямоугольные флотаторы Rictor AquaDAF

■ Особенности флотации в слое пузырьков

Необходимость разработки высокоскоростной технологии флотации диктовалась стремлением повысить скорость разделения фаз сверх 10–12 м/ч и тем самым уменьшить размеры сооружения.

Совершенствование гидравлики традиционных флотаторов (теоретически поток циркулирует в них по диагонали резервуара) происходило с помощью различных способов «выпрямления» струй жидкости, причем основные работы велись в следующих направлениях:

- обеспечение диффузии насыщенной воздухом воды по всей площади флотации,
- применение донных коллекторов или перфорированного днища для сбора воды на всей площади флотатора, а не только на одном из его концов,
- применение погружных тонкослойных систем, главная роль которых заключается в задерживании пузырьков воздуха, обеспечении их коалесценции и, следовательно, в создании условий, благоприятствующих их всплытию.

В результате эмпирических усовершенствований конструкции флотатора во втором направлении удалось создать настоящий равномерный слой пузырьков высотой от 1 до 2 м.

Слой пузырьков, а фактически «подушка», концентрация которой уменьшается в направлении сверху вниз, продолжает флокуляцию, усиливает процесс сцепления флокул с пузырьками воздуха и позволяет увеличить скорость подъема комплексов из флокул и пузырьков воздуха за счет повышения скорости подъема микропузырьков с 5 до 30–40 м/ч в результате их коалесценции и/или агломерации. Дополнение такого подхода разработками в третьем направлении позволило еще немного увеличить эти скорости.

Действие слоя пузырьков чем-то подобно действию слоя осадка в отстойниках типа **Pulsator**: флокуляция внутри слоя может продолжаться, однако разделение твердой и жидкой фаз улучшается благодаря более высокой, чем в традиционных реакторах диффузионного типа, концентрации пузырьков и флокул, что увеличивает вероятность их столкновения. Кроме того, «свободные» пузырьки могут коалесцировать между собой.

В результате:

- конфигурация флотатора со слоем пузырьков отличается от формы традиционного флотатора: его «длина» (расстояние от входа до выхода) меньше



Вход воды во флокулятор

Уплотненный слой флотопродуктов
и выход флотированной воды

Фото 27. Высокоскоростной прямоугольный флотатор Rictor AquaDAF, станция питьевой воды в Манаусе, Бразилия (8 камер флотации). Производительность станции $3,3 \text{ м}^3/\text{с}$, или $285\,000 \text{ м}^3/\text{сут}$

«ширины», за счет чего слой пузырьков распространяется по всему объему аппарата,

— длительность предварительной флокуляции может быть сокращена до 10–15 мин (вместо 20–30 мин),

— полезная скорость флотации возрастает до 20–40 м/ч в зависимости от характеристик флоккул и температуры воды.

— благодаря своей конфигурации флотатор удобен для отвода флотопродуктов переливом (небольшая высота при значительной ширине) «Гидравлический нож» позволяет отделить от стенок слой флотопродуктов, что уменьшает количество воды, сливающейся вместе с ними

На рис 30 схематически иллюстрируется различие масштабов традиционного флотатора и флотатора **Rictor AquaDAF**, последний является наилучшим аппаратом, который можно рекомендовать для обработки вод с относительно невысокой мутностью, особенно воды озер (даже затрофированных), и с высокой цветностью, а также для третичной очистки ГСВ и некоторых ПСВ и др

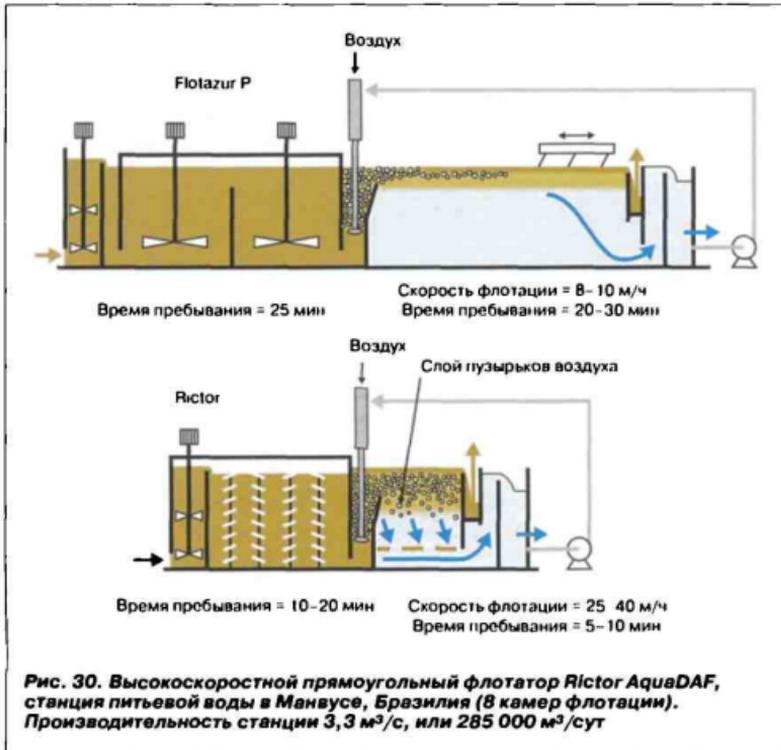
4.2.2.3. Аппараты типа флотатор-фильтр

Близость скоростей обрабатываемой воды в традиционном флотаторе и фильтре (5–12 м/ч) навела на мысль об использовании нижней зоны флотатора в качестве верхней части фильтра (рис 31) фильтрующий материал располагают не на традиционной донной плите, а на несущем полу с дренажными колпачками, регулирующее устройство (сифон или поплавковый клапан), установленное на выходе фильтрованной воды, сохраняет постоянство ее уровня независимо от степени загрязненности фильтра

Аппараты такого типа должны состоять из отдельных секций, включающих в себя систему флокулятор–флотатор–фильтр, поскольку при промывке фильтра

— во флокулятор не должна подаваться вода,

— флотатор должен быть приведен в состояние перелива (удаление промывной воды и, при необходимости, слоя флотопродуктов).



4.3. Флотаторы для уплотнения осадков

4.3.1. Общие понятия

При высоком содержании в воде ВВ (несколько граммов на 1 л) флотацию производят в аппаратах, которые имеют следующие особенности

- специально разработанная конструкция камеры смешивания,
- увеличенная высота флотатора (до 80 см), что позволяет накапливать значительные объемы флотопродуктов и тем самым оптимизировать их уплотнение,
- наличие скребкового механизма с большим количеством скребков,
- специальная конструкция лотков для отвода флотопродуктов, позволяющая увеличить их объем, извлекаемый при каждом проходе скребка,
- возможность установки на рычагах скребков специального перекрытия, защищающего от распространения запахов (см ниже)

Во флотаторах-уплотнителях обычно используют принцип **прямого насыщения**. Хотя применение прямоугольных флотаторов в качестве флотаторов-уплотнителей вполне допустимо, следует помнить, что аппараты радиального типа позволяют



получать более высокие рабочие характеристики (особенно на сооружениях большого размера) за счет использования несложного оборудования, не требующего значительного технического обслуживания

Критерием при расчете сооружения является удельная массовая нагрузка, величина которой может изменяться от 3 до 12 кг сухого вещества/(м² ч) в зависимости от концентрации и характера осадка (иловый индекс), а также от использования (или неиспользования) полимерного флокулянта. Концентрация отводимых флотопродуктов может варьироваться от 25 до 60 г/л в зависимости от его происхождения

4.3.2. Перекрытие для защиты от распространения запаха

Над флотаторами-уплотнителями можно устанавливать защитные перекрытия (хотя это и необязательно), в частности вращающееся перекрытие из ткани, натянутой на рычаги скребков. При таком способе перекрытие осуществляется на уровне зеркала воды, что существенно снижает объемы воздуха, требующие дезодорирования (см. рис. 29)

4.3.3. Флотаторы-уплотнители типа FE и FES

Существует два типа флотаторов-уплотнителей (см. также гл. 18, п. 2): — металлические (флотатор-уплотнитель **FE** — от фр *flottateur-épaisseur*), стандартизуемые до диаметра 8 м. Систем скребков оснащена центральным приводом,



Фото 28. Флотаторы-уплотнители с перекрытием. Очистные сооружения «Achères» (Парижский регион, Франция), 8 аппаратов диаметром 20 м

— бетонные (флотатор-уплотнитель **FES** — от фр *flottateur-epaississeur standardisé*), стандартизуемые до диаметра 20 м Система скребков имеет периферийный привод. Аппараты диаметром 15 м и более оснащают двумя желобами для отвода осадка, расположенными на противоположных сторонах флотатора друг напротив друга



Глава

11

-
1. СПОСОБЫ ОБРАБОТКИ ВОД
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
СВОБОДНОЙ БИОМАССЫ 875
 2. СПОСОБЫ С ФИКСИРОВАННЫМИ
КУЛЬТУРАМИ 924
 3. СТАНДАРТНЫЕ КОМПАКТНЫЕ
УСТАНОВКИ 941
 4. СНИЖЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ОСАДКА 946
 5. ПРОГРАММЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ
БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ:
ONDEOR 954

Биологические способы обработки

В гл. 4 рассматриваются общие принципы и механизмы различных биологических процессов, применяемых для обработки как питьевых, так и сточных вод. В этой главе рассматриваются способы и технологии их реализации на практике.

Кроме того, в гл. 23 описываются технологические линии, в которых объединяются эти технологии и установки для комплексной обработки городских сточных вод (ГСВ).

1. Способы обработки вод с использованием свободной биомассы

Разнообразие упомянутых процессов с использованием активного ила (часто в литературе принимается сокращение АИ) и подобных культур, так же как и число конструкций биологических реакторов, возросло со времени их первоначальной разработки под действием таких факторов, как необходимость в повышении качества очищенной воды, углубление знаний о микробиологических процессах, технологическое совершенствование оборудования, приборов и средств автоматизации, потребность в снижении инвестиционных и эксплуатационных расходов и др.

После того как в 1920 г. появился способ обработки активным илом, были созданы различные конструкции реакторов с поршневым потоком, с полным перемешиванием, в виде канала окисления. Биореакторы последовательного действия, в виде многоступенчатых систем обработки, в частности, для удаления азота и фосфора

В течение последнего десятилетия с разработкой мембранных биореакторов в очистку сточных вод была внедрена и мембранная технология.

Эти разнообразные способы и технологии, а также необходимые для их эксплуатации функциональные элементы (системы аэрации, осветления, рециркуляции ила и т. д.) описываются ниже.

1.1. Общие принципы

По определению система обработки активным илом состоит из трех основных элементов

- реактор (обычно называемый аэротенком), в котором находится аэрируемая суспензия микроорганизмов, осуществляющих очистку;
- вторичный отстойник, или осветлитель, в котором происходит отделение ила от воды;
- устройство для рециркуляции забираемого из отстойника ила в реактор

В большинстве случаев технология с активным илом применяется в сочетании с физическими или химическими процессами, используемыми для предварительной и первичной обработки сточных вод, а также часто и для завершающей очистки, включающей обеззараживание и, возможно, фильтрование.

Основные параметры технологии обработки вод активным илом рассмотрены в гл. 4, п. 2.1. В табл. 1 приведена общая классификация биореакторов.

Таблица 1
Классификация реакторов с активным илом по их нагрузке и характеристикам

Тип реактора (по величине нагрузки)	Нагрузка кг БПК ₅ на 1 кг ЛВ в 1 сут	Производительность кг БПК ₅ на 1 м ³ объема реактора за 1 сут	Среднее время пребывания в реакторе ч	Потребность в O ₂ , кг на 1 кг удаленной БПК ₅	Эффект очистки % по БПК ₅	Плотность ила кг СВ на 1 кг удаленной БПК ₅	Нитрификация (окислено соли аммония)
Очень высокая	3,0	6,0	1,0	0,6-0,7	75	1,5	Нет
Высокая	1,0	2,5	2,4	0,7-0,8	80	1,0	Нет
Средняя	0,5	1,5	4	0,8-1,1	85	0,9	Частичная (в зависимости от температуры)
Низкая	0,2	0,8	8	1,3-1,5	90	1,05 ¹	Есть
Очень низкая	0,07	0,3	20	1,6-1,9	90-95	0,9 ¹	Есть

¹ Без первичного отстаивания

1.2. Системы аэрации

1.2.1. Критерии эффективности и сравнение аэрационных систем

Системы аэрации, предназначенные для реакторов с активным илом, служат двум целям.

- снабжают аэробные микроорганизмы кислородом, в котором они нуждаются, обычно получаемым из воздуха.
- обеспечивают гомогенизацию и перемешивание, необходимые для постоянного контакта живых организмов с аэрированной водой и загрязняющими веществами

Системы аэрации состоят чаще всего из установки или группы установок, помещенных в сооружение определенной формы и размеров и выполняющих обе указанные функции одновременно

В некоторых случаях аэрация и перемешивание разделены. Такую систему, в которой гомогенность смеси обеспечивает механическая мешалка, установленная в дополнение к аэратору или вместо него, называют раздельной системой аэрации-перемешивания

1.2.1.1. Производительность систем аэрации

Для получения точных результатов по производительности системы аэрации следовало бы определять и контролировать ее в условиях эксплуатации — в присутствии активного ила и поступающего потока загрязнений. Однако проводить измерения при таких условиях очень сложно, в частности, по причинам биологической активности и из-за проблемы представительности точек измерения. Поэтому эффективность системы аэрации оценивают, как правило, на чистой воде, при этом величина погрешности снижается до $\pm 5 \pm 10\%$ в зависимости от формы испытательного резервуара. Результаты приводят затем к нормальным условиям

- чистая вода,
- температура 20 °С,
- нормальное атмосферное давление 1013 мбар;
- постоянное содержание растворенного кислорода 0 мг/л

Широко распространенной методикой измерения является повторное насыщение жидкости кислородом в резервуаре. Из чистой воды предварительно удаляют кислород введением сульфита натрия Na_2SO_3 с избытком в присутствии кобальта в качестве катализатора. После этого запускают систему аэрации и периодически измеряют концентрацию кислорода. Возрастание концентрации O_2 во времени вычисляют по формуле (см. гл. 9)

$$\frac{dC}{dt} = K_L a (C_S - C),$$

где.

C — концентрация кислорода, мг/л,

$K_L a$ — общий коэффициент переноса, отражающий переход кислорода из газовой фазы (воздуха) в жидкую (воду), ч⁻¹,

C_S — концентрация кислорода в насыщенной воде, мг/л.

Переход от экспериментальных значений на чистой воде к величинам при нормальных условиях осуществляют путем внесения поправок на температуру воды и атмосферное давление.

$$K_L a S = K_L a \cdot 1024^{(20 - t)},$$

$$C_5S = C_S \frac{C_S(20^\circ\text{C})}{C_S(t)} \frac{1013}{P_{\text{атм}}}$$

где

$K_1 aS$ и C_5S — величины $K_1 a$ и C_5 при нормальных условиях,

$C_S(20^\circ\text{C})$ и $C_S(t)$ — насыщающие концентрации кислорода при абсолютном давлении 1013 мбар и, соответственно, при 20°C [$C_S(20^\circ\text{C}) = 9,09$ мг/л] и температуре воды t во время испытания (см. норму EN 25814 во Франции),

$P_{\text{атм}}$ — атмосферное давление во время испытания, ГПа или мбар;

t — температура воды во время испытания, $^\circ\text{C}$

Измерения концентрации как функции времени позволяют определить общий коэффициент $K_1 a$ при температуре t , а затем и $K_1 aS$

Часовая подача кислорода, кг/ч (фр. AH — *l'approt horaire* или англ. $SOTR$ — *standard oxygen transfer rate*), является основным параметром аэратора. Она определяет количество кислорода, которое аэратор способен внести в массу жидкости при стандартных условиях. Часовую подачу вычисляют по результатам измерений согласно формуле

$$AH = K_1 aS V C_5S/1000,$$

где V — объем жидкой массы, м^3

1.1.2.2. Критерии эффективности

Полная удельная подача кислорода (фр. ASB — *apport spécifique brut* или англ. SAE — *standard aeration efficiency*) — это количество переносимого кислорода в расчете на единицу потребляемой энергии.

$$ASB = \frac{AH}{PA}, \text{ кг } O_2/(\text{кВт} \cdot \text{ч}),$$

где PA — общая мощность комплекта оборудования для аэрации в установившемся режиме (мощность, потребляемая электромотором или моторами), кВт.

Величина ASB особенно удобна для сравнения разных систем аэрации. Ее можно применять при любой используемой технологии, и она напрямую связана со стоимостью эксплуатации аэратора

Эффективность насыщения кислородом (фр. RO — *rendement d'oxygénation* или англ. $SOTE$ — *standard oxygen transfer efficiency*) применяется только для систем со сжатым воздухом. Она выражается долей кислорода (в процентах), перешедшего в раствор, от общей массы кислорода, поданного в воду системой сжатого воздуха. Принимая массу кислорода равной $0,3$ кг/Нм³ воздуха, можно вычислить эффективность насыщения кислородом

$$RO, \% = \frac{AH}{0,3 Q}$$

где Q — объем подачи сжатого воздуха, Нм³/ч (в нормальных условиях температура 0°C , атмосферное давление 1013 мбар).

Заметим, что зачастую практичнее пользоваться величиной **удельной эффективности насыщения кислородом** (фр. RO_s — *rendement d'oxygénation spécifique* или англ. $SSOTE$ — *standard specific oxygen transfer efficiency*), выражаемой в процентах на метр (%/м), которая увязывает эффективность диффузора с глубиной его погружения

Комплекс аэратор–резервуар неразделим, и любая характеристика системы аэрации должна связываться с параметрами всего комплекса. Например, извест-

но, что в исключительных условиях эффективность насыщения кислородом может быть повышена при большой удельной мощности аэрирования (на 1 м^3 резервуара) для поверхностных аэраторов или при малом расходе воздуха на диффузор в пузырьковых системах

1.2.1.3. Параметры для сравнения аэраторов и перехода от нормальных условий к условиям эксплуатации

Сравнительные характеристики аэраторов при действии на чистой воде могут отличаться от показателей, получаемых в реальных эксплуатационных условиях. Действительно, на процесс переноса кислорода значительно влияют состав сточных вод, качество ила, гидравлические и биологические условия функционирования

В общем виде все величины, измеренные и определенные в реальных условиях, отмечаются знаком '-'. Чтобы перейти от стандартных условий к реальным условиям эксплуатации, следует ввести поправочные коэффициенты T_p , T_d и T_1 . В общем виде

$$AN' = TAN \text{ и } ASB' = TASB.$$

■ T_p — коэффициент перехода от чистой к сточной воде

В англоязычной литературе его часто обозначают α . Он зависит от состава сточных вод, и в частности от содержания поверхностно-активных веществ, жиров, взвешенных веществ (ВВ), а также от системы аэрации (интенсивности подачи воздуха)

$$T_p = \frac{K_L a'}{K_L a}$$

■ T_d — коэффициент дефицита кислорода

Подача кислорода пропорциональна дефициту кислорода, вычисляемому по формуле

$$C_S' - C_X.$$

где

- C_S' — насыщающая концентрация кислорода в реальных условиях, зависящая:
 - от солесодержания воды,
 - от температуры (см. гл. 8, п. 3.3.2, табл. 36),
 - от атмосферного давления,

C_X — содержание кислорода в сточной воде, чаще всего находится в пределах 0,5–2,0 мг/л.

Тогда

$$T_d = \frac{C_S' - C_X}{9,09}.$$

Для учета реальных условий в резервуарах с большой высотой слоя воды эта упрощенная формула должна быть дополнена. Отмечено, что в хорошо перемешиваемой системе насыщающая концентрация превышает табличные значения, приведенные для атмосферного давления. Поэтому для учета высоты водяного столба следует ввести коэффициенты K_H и K_{H0} (величина K_H в нормальных условиях).

$$T_d = \frac{C_S' K_H - C_X}{9,09 K_{H0}}, K_H = \frac{P_{\text{атм}} + 0,4gH}{P_{\text{атм}}} \text{ и } K_{H0} = \frac{1013 + 0,4gH}{1013}.$$

где

$P_{атм}$ — атмосферное давление в период испытаний,

g — ускорение свободного падения,

H — глубина погружения диффузоров

В нормальных условиях $C_S = 9,09$ мг/л, а $C_x = 0$, тогда $T_0 = 1$

■ T_1 — коэффициент скорости переноса

При повышении температуры скорость переноса кислорода из газа в жидкость увеличивается. Соответствующая поправка $T_1 = 1,024^{l-20}$, где температура l выражена в градусах Цельсия

Отметим, что коэффициенты T_0 и T_1 не зависят от системы аэрации в отличие от коэффициента перехода T_p . Вследствие этого характеристики различных систем аэрации при переходе от нормальных условий к реальным условиям эксплуатации изменяются по-разному. Точное определение коэффициента T_p требует тщательных измерений, которые лучше выполнять на пилотной установке биологической очистки, имеющей достаточно крупный размер и заполняемой реальными сточными водами

Коэффициент T_p имеет гораздо меньшую значимость в случае диффузии воздуха в «мелких пузырьках», чем при диффузии в «крупных пузырьках» или при поверхностной аэрации, в частности, из-за влияния поверхностно-активных веществ.

Показанный выше метод перехода от нормальных условий к реальным полностью приемлем в системах с невысокой эффективностью насыщения кислородом (порядка 5–6 %/м) и не слишком высоким слоем воды, как правило 4–8 м. Компания «Дегремон» использует адаптированную компьютерную программу, разработанную на основе моделирования процессов аэрации с погружением аэраторов на глубину до 25 м и при эффективности, достигающей примерно 85 %

1.2.1.4. Критерии сравнения

Первый критерий сравнения аэраторов, разумеется, основан на их характеристиках насыщения кислородом, выраженных в показателях часовой и полной удельной подачи кислорода

Но для сравнения требуется привлекать дополнительные критерии, которые с трудом выражаются в цифрах и могут оцениваться лишь качественно

- перемешивание, оно должно обеспечивать хорошую гомогенизацию и предотвращать отложение осадков,
- гибкость по эффективности аэрации при различных режимах работы,
- надежность всех узлов системы аэрации, таких как редукторы, компрессоры, диффузоры, трубопроводы и т. д.

Бесполезным, например, окажется аэратор, имеющий превосходные характеристики насыщения кислородом за счет недостаточного гидравлического перемешивания или повышенного риска засорения, в результате чего в аэротенке может замедлиться окисление загрязнений или образоваться анаэробный осадок.

1.2.2. Аэрация сжатым воздухом

Аэрация сжатым воздухом заключается в продувании (барботаже) воздуха через жидкую массу с глубиной от 1 до 15 м и более в зависимости от типа используемого устройства

Устройства аэрации сжатым воздухом делят на три большие группы, исходя из размеров образующихся пузырей воздуха.

- крупные пузыри ($\varnothing > 3$ см), вертикальные трубки, диффузоры с большими отверстиями,
- средние пузыри (\varnothing от 5 мм до 3 см) различные диффузоры, уменьшающие размер выпускаемых пузырьков, — клапаны, мелкие отверстия и др.
- мелкие пузыри ($\varnothing < 5$ мм) пропускание воздуха сквозь пористые материалы или эластичные мембраны с тонкой порфорацией

Приведенные ниже сравнительные величины являются обычными параметрами для очистных сооружений, работающих в обычных условиях

1.2.2.1. Эффективность насыщения кислородом

Эффективность насыщения кислородом чистой воды для любой конкретной системы аэрации зависит от глубины введения воздуха. Увеличение глубины продлевает время пребывания пузырьков воздуха в жидкости и, следовательно, повышает эффективность переноса газа. В пределах глубины от 3 до 8 м эффективность почти пропорциональна глубине. Это позволяет определить эффективность в расчете на метр погружения. Удельная эффективность насыщения кислородом варьируется в зависимости от размера пузырьков

- средние и крупные пузыри — от 2 до 4 %/м,
- мелкие пузырьки — от 5 до 7 %/м

Влияние размера пузырей, существенное в чистой воде, в реальных условиях усредняется (коэффициент T_p менее значим для мелких пузырей)

- крупные и средние пузыри — T_p колеблется между 0,95 и 0,8 (для ГСВ),
- мелкие пузырьки — между 0,7 и 0,5 (для ГСВ)

Тем не менее экономия в энергии в системах с мелкими пузырьками оказывается существенной и оправдывает их использование, несмотря на более высокую стоимость установки

На эффективность насыщения кислородом в системе со сжатым воздухом влияют и многие другие факторы

- **увеличивая мощность**. По сравнению с поверхностными аэраторами наблюдается обратная тенденция. Увеличение мощности, как правило, обусловлено увеличением расхода воздуха. Однако больший расход воздуха приводит не только к увеличению размера пузырей, но и к возрастанию вероятности их коалесценции и к снижению эффективности насыщения кислородом,
- **гидравлика**. Она зависит от расположения диффузоров (как и от процесса перемешивания). Эффективность насыщения кислородом оптимальна при расположении диффузоров по всему дну аэротенка, поскольку при этом обеспечивается хорошее распределение пузырей в жидкой массе и максимальное время контакта (рис. 1). Расположение диффузоров в ряд приводит к снижению эффективности насыщения кислородом примерно на 25 %, что связано с возникновением внутренних циркуляционных потоков воды,
- **поперечное сечение резервуара**. В частности, каналы, имеющие в сечении форму трапеции, обладают значительно меньшей эффективностью по сравнению с прямоугольными

1.2.2.2. Перемешивание

Общее правило гласит, чем выше уровень воды в резервуаре, тем эффективнее перемешивание сжатым воздухом. Оно обеспечивает хорошую гомогенизацию, поскольку вовлекает в движение всю массу жидкости.

Расположение диффузоров на дне (см. рис. 1) способствует эффективному перемешиванию при условии приемлемых значений минимального расхода воздуха и



Фото 1. Система диффузоров Flexzur T 80



Фото 2. Система диффузоров Flexzur D 33

кислородом — от 20 до 25 % при глубине воды 4 м в стандартных условиях. При малом расходе воздуха эффективность может превышать 30 %

Полная удельная подача кислорода на чистой воде (ASB) составляет 3,0–3,5 кг O₂/(кВт ч), а в реальных условиях (ASB') — 1,8–2,1 кг O₂/(кВт ч)

Диффузоры Flexzur из ПВХ или нержавеющей стали устанавливаются на неподвижной или подъемной конструкции в придонной зоне аэротенков глубиной до 11 м. В зависимости от интенсивности работы их долговечность составляет от 6 до 10 лет

Главными преимуществами аэраторов Flexzur являются

- высокая эффективность аэрации,
- отсутствие затруднений при остановке аэрации,
- простое обслуживание диффузоров без остановки работы аэротенка,
- долговечность,
- опорные конструкции из материалов, не подверженных коррозии,
- легкая замена диффузора или только мембраны

1.2.2.4. Пористые диски DP 230

Пористый диск DP 230 (фото 3) состоит из гранул искусственного корунда (оксид алюминия-α), сваренных с керамическим связующим материалом, остеклованным при высокой температуре. Выбранный размер гранул обеспечивает приемлемый компромисс между достаточно высокой эффективностью насыщения кислородом и долгой непрерывной работой (пока не произойдет засорения). Для гранул применяются также пластиковые материалы (например, литой полиэтилен)

Диски, закрепленные на опорных цоколях из ПВХ или из нержавеющей



Фото 3. Пористый диск во время работы

стали, монтируются аналогично диффузору **Flexazur D 33**. Обычно их устанавливают в аэротенках глубиной 3–8 м. Они обеспечивают хорошую номинальную эффективность насыщения кислородом, примерно 17–22 % при 4-метровом погружении. Полная удельная подача кислорода на чистой воде (ASB) составляет 2,4–2,8 кг O₂/(кВт·ч), а в реальных условиях (ASB') — 1,5–1,7 кг O₂/(кВт·ч).

Вводимый воздух предвременно должен быть тщательно профильтрован (содержание пыли 15 мг на 1000 Нм³ воздуха).

Риск забивания илом существенно зависит от частоты перерывов в продувке, во время которых ил проникает через поверхность диска. Поэтому перерывов следует избегать. Срок непрерывной службы дисков, как правило, составляет 10 лет и более. По окончании этого периода диски можно регенерировать прокаливанием.

1.2.2.5. Диффузоры Vibrair



Фото 4. Диффузоры Vibrair

Диффузоры **Vibrair** предназначены для формирования **пузырей воздуха среднего размера** и приспособлены для работы в трудных условиях в иле, содержащем много волокон, углеводов, жиров и т.п., которые быстро забивают аэраторы, формирующие мелкие пузырьки.

Диффузор **Vibrair** (фото 4) состоит из литого полиэтиленового корпуса, к которому прикреплен вибрирующий клапан. Постоянные колебания клапана препятствуют забиванию диффузора. Это оригинальное устройство не требует большого расхода воздуха, а размещение в аэротенке значительного числа диффузоров **Vibrair** благоприятствует высокой эффективности насыщения кислородом и перемешивания иловой смеси. Они устанавливаются на придонной распределительной сети, как показано на фото 5.

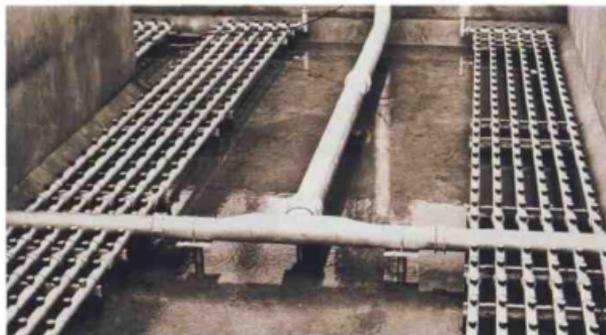


Фото 5. Аэротенк, оборудованный диффузорами Vibrair (вариант размещения в ряд)

Обе модели диффузора **Vibrair** (см фото 4) могут работать с расходом воздуха от 1–3 до 2–10 $\text{Nm}^3/\text{ч}$ при потере напора порядка 20 мбар

Эффективность насыщения кислородом с использованное отверстие) Предназначенный главным образом для азротенков большой глубины, диффузор имеет эффективность насыщения кислородом 22–26 % при 8-метровом погружении. В реальных условиях коэффициент T_{O} может достигать 0,9. Действие эрлифта за счет подаваемого в него воздуха обеспечивает превосходное перемешивание обрабатываемой воды от самого дна, несмотря на редкую расстановку диффузоров **Dipair** (достаточно одного азротенка на 2 m^2 поверхности дна азротенка)

Диффузоры **Vibrair**, несмотря на меньшую эффективность аэрации, чем у азраторов с мелкими пузырьками, имеют и некоторые преимущества

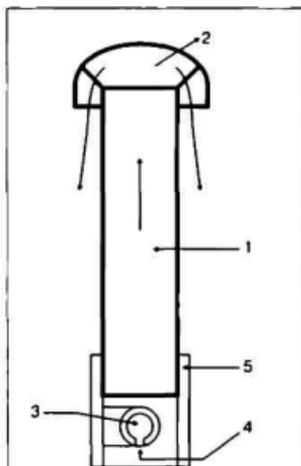
- постоянное гидравлическое сопротивление,
- надежность и долговечность (> 10 лет),
- пригодность для процессов очистки промышленных сточных вод (ПСВ) в азротенках, в резервуарах-накопителях с пневматическим перемешиванием и т. д.

1.2.2.6. Диффузоры Dipair

Диффузоры **Dipair** являются погружными статическими азраторами, предназначенными для размещения на дне сооружений глубиной от 7 до 12 м (рис. 2, фото 6)

Благодаря отсутствию подвижных элементов диффузор **Dipair** не подвергается износу. Изготовленный из полипропилена или нержавеющей стали, он устойчив к коррозии.

Расход воздуха через диффузор **Dipair** изменяется от 20 до 60 $\text{Nm}^3/\text{ч}$ при потере напора около 30 мбар (полный расход через калиброванное отверстие)



- 1 Эрлифт
- 2 Колпак для поворота потока
- 3 Трубопровод подачи воздуха
- 4 Калиброванное отверстие
- 5 Ножи для крепления на дне

Рис. 2. Схема диффузоров Dipair



Фото 6. Глубокий азротенк с диффузорами Dipair на сооружениях в Тарвсоне (Буш-дю-Рон, Франция) для целлюлозного предприятия «Cellulose du Rhône». Производительность сооружений 36 000 $\text{m}^3/\text{сут}$



Фото 7. Диффузор Oxazug

1.2.2.7. Диффузоры Oxazug

Диффузоры Oxazug (фото 7) формируют пузыри воздуха среднего размера, они предназначены для размещения на дне резервуара и разработаны для реакторов с культурами микроорганизмов, прикрепленными на гранулированном носителе

Воздух выходит из диффузора через отверстие диаметром около 1 мм в эластичной литой мембране, сделанной из специального эластомера и помещенной в полипропиленовый корпус. Мембрана способна к деформации, при этом диаметр отверстия под действием потока воздуха может увеличиваться вдвое, что позволяет бороться с закупориванием отверстий бактериальными пленками.

Расход воздуха через диффузор составляет примерно $1-2 \text{ Нм}^3/\text{ч}$ при потере напора

50 мбар. Номинальная эффективность насыщения кислородом для сети диффузоров Oxazug достигает 15–25 % при 4-метровом погружении, чему способствует хорошее распределение воздуха в носителе (загрузке).

1.2.3. Погружные механические аэраторы

Существенное отличие погружных механических аэраторов от поверхностных состоит в том, что они вводят воздух непосредственно в объем жидкости.

Они состоят

- из двигателя,
- из вращающейся турбины или насоса;
- из устройства для диспергирования воздуха.

По типу конструкции аэраторы могут быть самовсасывающими, т. е. не нуждающимися в подводе сжатого воздуха, или, наоборот, действующими только от источника сжатого воздуха.

Величина полной удельной подачи кислорода (ASB) у аэраторов этого типа варьируется, но она выше в системах с подачей сжатого воздуха.

Преимущества погружных аэраторов заключаются в простоте эксплуатации и особенно в легкости обслуживания по сравнению с насосными системами. К тому же их просто устанавливать.

Колеса турбин или насосов должны исследоваться на предмет возможности их засорения различными веществами и частицами, попадающими в аэротенки. Устойчивость к химическим веществам делает эти аэраторы особенно пригодными для ПСВ, но их с успехом можно использовать также и на сооружениях по очистке ГСВ.

1.2.3.1. Аэраторы с погружной турбиной

Турбины аэраторов должны проектироваться для работы в двухфазной среде (воздух + вода) и быть устойчивыми к загрязнению.

Воздух подводится на уровень турбины, где он и рассеивается. Турбина, приводя в интенсивное движение воду или водно-воздушную смесь, формирует пузыри воздуха от мелкого до среднего размера.

Перемешивание получается особенно эффективным, поскольку энергия расходуется вблизи дна (исключено отложение осадков), и затем водно-воздушная смесь рассеивается по всему объему (хорошая гомогенизация) Для самых крупных моделей аэраторов радиус действия превышает 10–13 м

Эффективность аэрации описанными устройствами сильно зависит от геометрии аэротенка, а также от взаимодействия между соседними аэраторами В частности, близость другого устройства или стенки значительно снижает перенос кислорода в раствор из-за создающегося восходящего потока

Турбинные аэраторы можно устанавливать на глубине более 10 м Скорость вращения турбины невелика, что позволяет избежать разрушения хлопьев ила Для оптимальной работы в любом режиме достаточно регулировать расход воздуха и скорость вращения турбины

Преимущество турбинных аэраторов состоит в том, что их функционирование возможно в режиме как перемешивания вместе с аэрацией, так и только перемешивания Это придает очень большую гибкость в эксплуатации и возможность их адаптации к выбранной технологии обработки воды

Аэратор с поверхностным приводом проще в обслуживании, поскольку для выполнения текущих операций не требуется грузоподъемного устройства (рис. 3, а) Но установка аэраторов с погружным двигателем (рис. 3, б) обходится дешевле

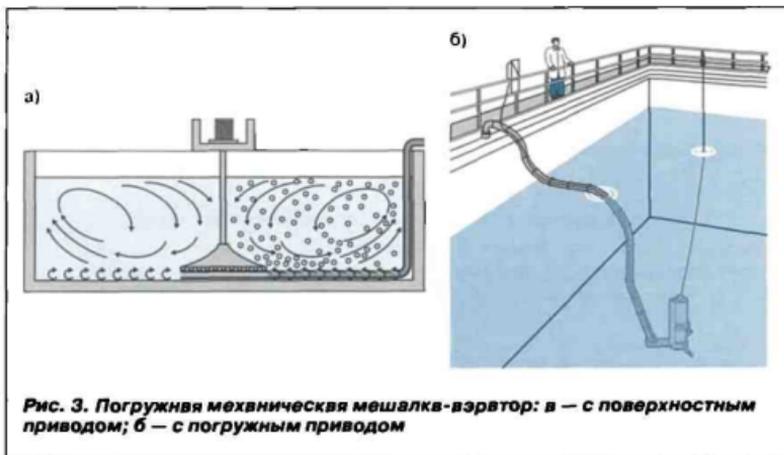


Рис. 3. Погружная механическая мешалка-аэратор: а — с поверхностным приводом; б — с погружным приводом

Величина полной удельной подачи кислорода ASB существенно меняется в зависимости от конструктивного решения и условий использования, например глубины погружения Механическая мощность привода турбины мало зависит от глубины ее размещения, и поэтому большое погружение турбины почти не сказывается на данном показателе

Величина ASB при благоприятных условиях (на чистой воде) составляет обычно 2,0–2,5 кг O_2 /(кВт · ч), а в реальных условиях (ASB') — 1,6–1,9 кг O_2 /(кВт · ч).

Основными достоинствами аэраторов с погружной турбиной являются:

- высокая эффективность аэрации;

- возможность управления интенсивностью аэрации,
- простота обслуживания,
- слабая зависимость от состава сточных вод;
- постоянство показателя ASB во времени

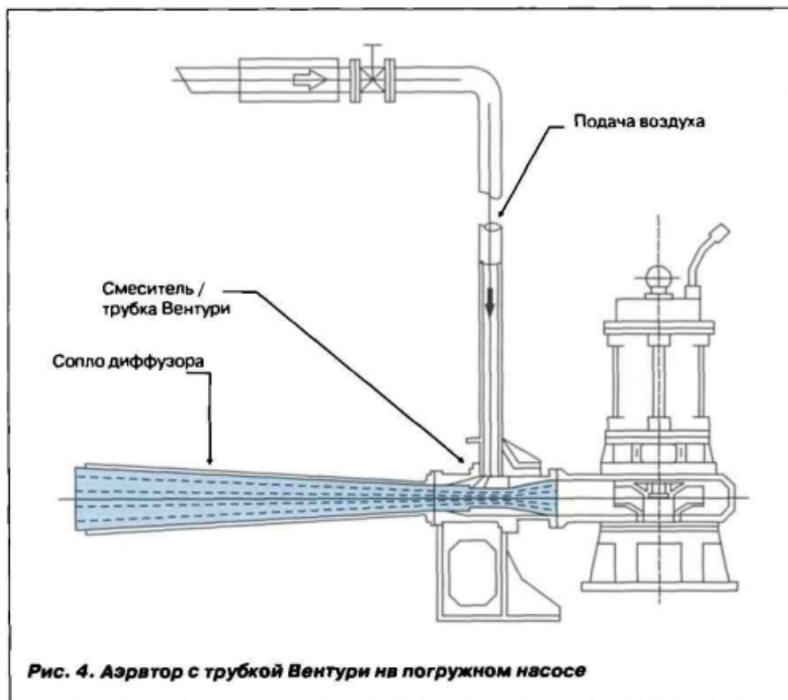
Некоторые из турбинных аэраторов на глубине до 4 м сами всасывают воздух и могут функционировать без компрессора, хотя и за счет снижения величины ASB

Для подачи воздуха в некоторые из турбинных аэраторов больше подходят центробежные воздуходувки, а не объемные, поскольку они имеют более подходящие рабочие характеристики.

1.2.3.2. Аэраторы с трубкой Вентури, или гидроэжекторы

Вместо подачи воздуха на ротор его вводят в смеситель, часто выполненный в форме трубки Вентури, что позволяет сочетать большую скорость перемешивания с эффектом всасывания. Смесь, состоящая из воды и мелких или средних пузырей воздуха, выбрасывается в жидкость через сопло (рис. 4)

Насос может быть погружным или поверхностным, он может обеспечивать воздухом один или несколько комплектов трубок Вентури с соплами



Выгода от установки нескольких гидроэжектеров заключается в улучшении перемешивания и ликвидации мертвых зон

Величина ASB варьируется от 1,2 до 1,7 кг O₂/(кВт · ч) Такие аэраторы часто используются с постоянной подачей чистого кислорода либо с его дополнительным введением в период сезонных пиков загрязнений При введении чистого кислорода величина ASB может возрасти до 5 кг O₂/(кВт · ч)

1.2.4. Поверхностная аэрация

1.2.4.1. Различия в конструкции аппаратов

Поверхностные аэраторы делятся на три группы

Две важнейшие из них — **аэраторы с малой скоростью вращения**

— **на вертикальной оси**, они засасывают воду через трубу или без нее и разбрызгивают ее в воздухе,

— **на горизонтальной оси**, в них водяное колесо для насыщения кислородом или щетка взмывает воду погруженной частью своих лопастей и выбрасывает ее вперед

Третью группу составляют **аэраторы на вертикальной оси с большой скоростью вращения** приводимые в движение непосредственно двигателем со скоростью 750–1500 об/мин без передаточного редуктора Они часто поддерживаются одним или несколькими поплавками, чтобы находиться на поверхности воды и быть мобильными Преимущество аэраторов третьей группы состоит в их дешевизне, но они потребляют много энергии [величина ASB редко превосходит 1,4 кг O₂/(кВт · ч)] и слабо перемешивают воду Они больше пригодны для лагун, чем для аэротенков с активным илом, в которых следует избегать отложения осадков

Поверхностные аэраторы изготавливаются с диапазоном изменения мощности от 2 до 50 кВт

1.2.4.2. Аэратор малой скорости на вертикальной оси Actifrotor

Аэраторы малой скорости на вертикальной скорости появились столь же давно, как и сама технология обработки сточных вод с использованием активного ила

Они имеют следующие достоинства

- простота установки и эксплуатации,
- средняя энергетическая эффективность,
- хорошее перемешивание жидкости (при соблюдении довольно строгих условий установки)

Аэраторы **Actifrotor** (рис. 5, фото 8) — это поверхностные вертикальные установки, разработанные компанией «Дегремон» Они выпускаются в диапазоне мощностей от 4 до 90 кВт Тысячи таких аэраторов находятся в эксплуатации, тем не менее их применяют все меньше и меньше из-за невысокой величины показателя ASB¹ и создаваемых ими неудобств (аэрозоль и шум) Эти неудобства можно ограничить при помощи надлежащей защиты от брызг в сочетании со звукоизоляцией редукторного узла

■ Подвижный элемент

Подвижным элементом аэратора **Actifrotor** (см рис. 5) является открытое колесо, что исключает всякую возможность засорения Оно представляет собой закрытую полую ступицу, на которой укреплены тонкие нагнетающие лопасти с изогнутым профилем и лопасти для рассеивания брызг

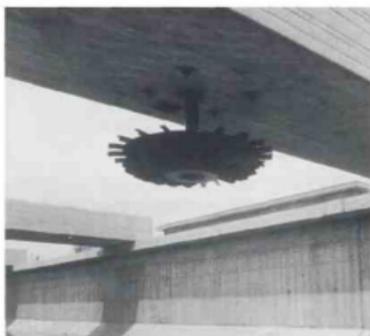
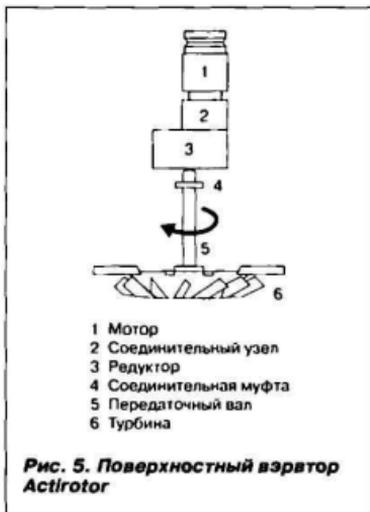


Фото 8. Actirotor R 8020 мощностью 75 кВт, установленный на железобетонном мостике

При скорости вращения примерно от 100 об/мин у небольших аппаратов и до 37 об/мин у крупных (90 кВт) окружная скорость составляет 4–4,5 м/с. Работа с ограничением мощности возможна на моторах двух-скоростных либо с переменной скоростью.

■ Установка

Оборудование чаще всего монтируют на неподвижной опоре, мостике (см. фото 8) или круглой платформе и при необходимости отгораживают полужестким кожухом, защищающим от аэрозоля и шума.

■ Энергетическая эффективность; условия для возможности перемешивания

Показатель полной удельной подачи кислорода ASB на чистой воде составляет от 1,6 до 1,8 кг O₂/(кВт · ч), а его величина в реальных условиях ASB' — 1,3 кг O₂/(кВт · ч). Чтобы достичь оптимальной эффективности переноса кислорода, необходимы перегородки, сдерживающие внутреннюю циркуляцию воды.

Для эффективного перемешивания уровень воды не должен быть выше 4,5 м.

1.2.4.3. Аэраторы малой скорости на горизонтальной оси: щетки Oхуфа и Vigox

Аэраторы малой скорости на горизонтальной оси подобны аэраторам на вертикальной оси в том, что они одновременно насыщают жидкость кислородом, разбрызгивая ее в воздухе, и перемешивают ее, приводя в движение. Щетки, используемые компанией «Дегремон» (Oхуфа и Vigox), предназначены для аэротенков с умеренной глубиной, построенных в форме вытянутых каналов или колец, в которых они возбуждают горизонтальное течение.

■ Подвижный элемент

Подвижным элементом щетки (фото 9) является горизонтальная труба диаметром 800–1000 мм и длиной 1–9 м с лопастями, установленными на кольцах таким образом, чтобы во время вращения щеток лопасти погружались в воду поочередно.

Щетка с двух концов опирается на достаточно прочные горцевые подшипники, которые тщательно герметизированы и защищены от брызг кожухами. Такое устрой-

ство гарантирует долговечность механизмов. Прикрытие трубы с лопастями кожухом со всех сторон обеспечивает снижение уровня шума и препятствует распространению аэрозоля.

■ Характеристики

Щетки изготавливаются двух типов:

- **Oxifa** (мощность от 3,5 до 15 кВт), предназначенные для азотенок глубиной 2,8–3,5 м,
- **Bigox** (мощность от 18,5 до 45 кВт), предназначенные для азотенок глубиной 3,5–4,5 м.

Величина показателя ASB составляет 1,66 кг O₂/(кВт ч).

При очистке ГСВ удельная мощность азотеров малой скорости на горизонтальной оси около 35 Вт/м³ позволяет обеспечить насыщение кислородом и перемешивание



Фото 9. Щетка Oxifa. Труба, оборудованная коронками и крылышками

1.2.5. Производство сжатого воздуха

Важным элементом систем, работающих на сжатом воздухе, а иногда и погружных механических азотеров является **производство сжатого воздуха**. Погружные диффузоры и азотеры обычно находятся на глубине от 3 до 8 м, что приводит к необходимости использования машин среднего давления.

Рекомендуемый тип машин существенным образом зависит от размера сооружений и потребности в воздухе, а также от типа используемых диффузоров. Машины могут называться воздуходувками или компрессорами в зависимости от расхода и давления воздуха на выходе.

Различают машины объемные и центробежные. Их принцип действия и области применения различны.

1.2.5.1. Объемные машины

У объемных машин, которые обычно относятся к воздуходувкам, зависимость давления воздуха от его расхода (рис. 6) близка к вертикальной прямой. Это озна-



Рис. 6. График зависимости давления в воздуходувке от расхода нагнетаемого воздуха

чает, что расход воздуха практически постоянен, каково бы ни было противодействие. За один оборот воздуходувки сжимается определенный объем воздуха. Обладая способностью вырабатывать одно и то же количество сжатого воздуха при любых условиях, объемные машины особенно подходят для диффузоров, сопротивление (падение напора) в которых меняется во времени. Тем не менее для изменения расхода воздуха должно быть предусмотрено управление скоростью вращения воздуходувки. Для этого устанавливают двухскоростной мотор или частотный регулятор.

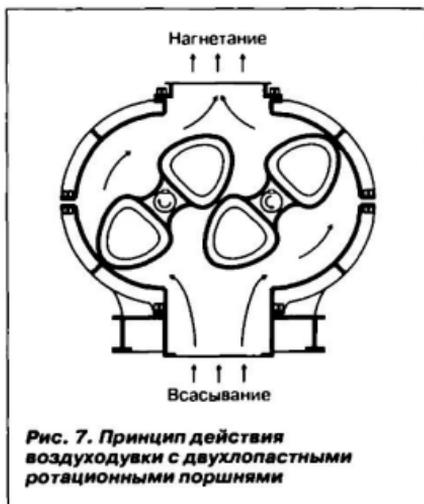


Рис. 7. Принцип действия воздуходувки с двухлопастными роторными поршнями

■ Принцип действия

Принцип действия воздуходувки с роторным поршнем (двухлопастным и даже трехлопастным) показан на рис. 7

Расход воздуха от самых крупных воздуходувок этого типа может достигать $8000 \text{ м}^3/\text{ч}$ при максимальном давлении нагнетания порядка 900 мбар. Поэтому они пригодны для азотенок глубиной до 7, максимум 8 м. Их КПД составляет примерно 70 %

Одним из ограничений для воздуходувок с роторным поршнем является температура нагнетаемого воздуха. Как правило, температура воздуха вследствие его сжатия поднимается до 135°C . При более высоких температурах происходит быстрое разрушение машины. Поэтому для правильного расчета системы азирования важно учитывать потерю напора на азэраторах к концу срока их службы.

Следует также отметить, что и уменьшение скорости вращения (например, при регулировке скорости) может приводить к усилению нагрева.

Винтовой компрессор относится к техническим средствам высокого давления (5 бар и более), и потому его можно приспособить для сооружений глубиной более 8 м. Надежность и высокий КПД (почти до 80 %) делают его идеальной машиной для эксплуатации с азэраторами Flexazur, позволяя, в частности, планировать и распределять обновление оборудования на многие годы.

■ Схема установки

Лучше всего, если каждый комплект оборудования для производства сжатого воздуха (одна, две или три машины) обслуживает отдельный резервуар.

Единственная рекомендуемая схема установки показана на рис. 8, а

В самом деле установка по схеме рис. 8, б неизбежно приведет к дисбалансу подачи воздуха, а значит, и к ухудшению процесса обработки воды. Причиной этого в первую очередь является невозможность точно установить азэраторы на одинаковой глубине в разных резервуарах, так как уровни основания и перелива различают-

ся. Далее, поскольку изменение уровня воды и неравномерность гидравлического сопротивления неодинаковы в каждом резервуаре, воздух не может распределяться равномерно.

1.2.5.2. Центробежные машины

В центробежных воздуходувках расход нагнетаемого воздуха в сильной мере зависит от давления нагнетания, как показано на рис. 9. Исходя из этого, данный тип машины идеально подходит для аэраторов, у которых потеря напора не меняется со временем. Регулирование расхода легко выполняется с помощью контрольного вентиля. Как видно на рис. 9, левая сторона графика ограничена. Эта зона, называемая зоной помпажа, обусловлена внезапным обращением потока воздуха на рабочие колеса по причине сильного противодавления. Приближение к этой зоне вызывает сильную вибрацию, которая может разрушить машину за несколько минут.

■ Принцип действия

В многоступенчатой центробежной воздуходувке достижение нормальной величины эксплуатационного давления требует использования нескольких последовательных ступеней компрессии (рис. 10). При скоростях вращения около 6000 об/мин и давлениях, достигающих 1000 мбар, расход подаваемого воздуха варьируется в пределах 1000–30 000 м³/ч.

Турбокомпрессор считается особым типом центробежной машины для производства сжатого воздуха. Благодаря огромной скорости вращения (10 000–12 000 об/мин) компрессия достигается в одну ступень. Объем подаваемого воздуха варьируется в диапазоне от 10 000 до 60 000 м³/мин при давлении нагнетания, достигающем 1200 мбар. Как правило, турбокомпрессоры используют на очистных сооружениях мощностью свыше 200 000 эквивалентных жителей (ЭЖ). Высокий

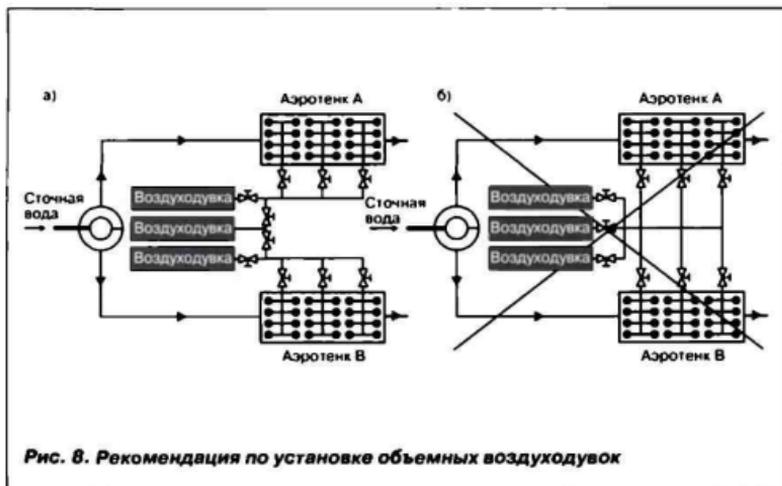


Рис. 8. Рекомендация по установке объемных воздуходувок

КПД (до 85 %) существенно улучшает показатель ASB. Более того, некоторые машины содержат энергетически эффективные интегрированные системы регуляции потока, обеспечивающие гибкость при эксплуатации

■ Схема установки

Рекомендуемая схема установки (см рис 8, а) отличается простотой и надежностью

Можно, однако, воспользоваться преимуществами в достижении больших объемов нагнетания и легкости регулирования расхода, предоставляемыми турбокомпрессором. Установка по схеме, показанной на рис 8, б, возможна и даже рекомендуется при наличии расходомера и регулирующих вентилей на главном трубопроводе каждого резервуара

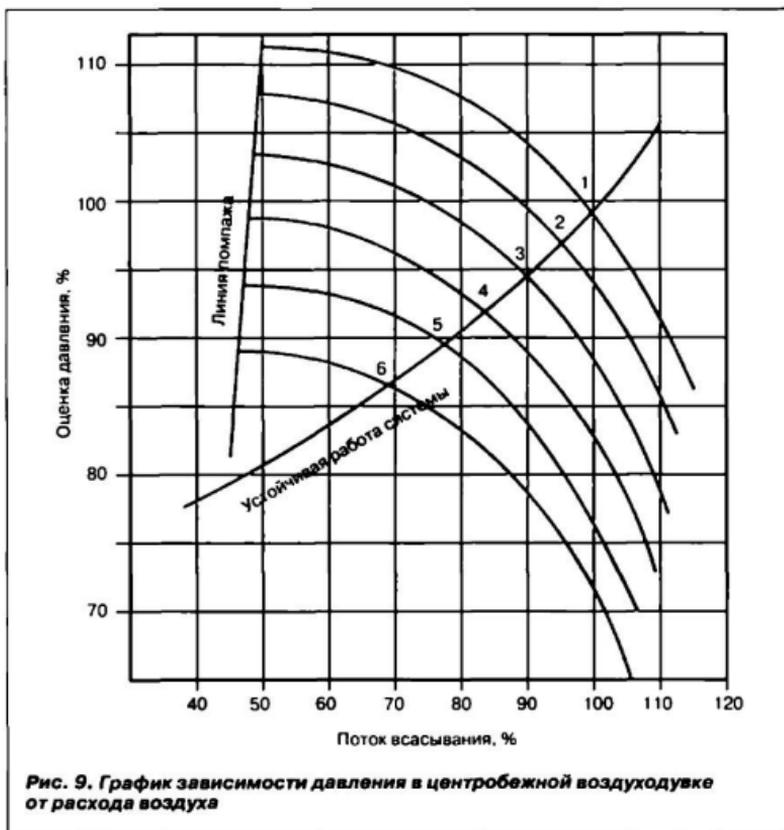


Рис. 9. График зависимости давления в центробежной воздуходувке от расхода воздуха

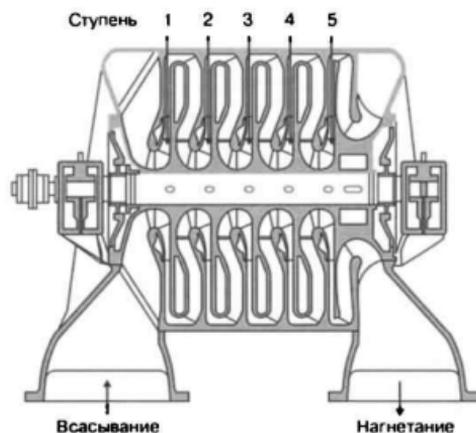


Рис. 10. Пятиступенчатая центробежная воздуходувка (вид в разрезе)

1.2.6. Сводка технических характеристик систем аэрации

Таблица 2
Сравнение систем аэрации

Устройство для аэрации		Полная удельная подача кислорода, кг O_2 /(кВт · ч)	
		в нормальных условиях, ASB	в реальных условиях, ASB'
Системы со сжатым воздухом	Flexazur T 80 и D 33 новые	3,0–3,5	1,8–2,1
	Flexazur T 80 и D 33 к концу срока службы	2,6–2,8	1,6–1,8
	Пористый диск DP 230	2,4–2,8	1,5–1,7
	Vibrair	1,8–2,2	1,4–1,7
	Dipaig	1,6–1,7	1,3–1,6
Механические погружные аэраторы	Аэраторы на сжатом воздухе	2,0–2,5	1,6–1,9
	Аэраторы эжекторного типа или самовсасывающие	1,2–1,7	0,9–1,2
Поверхностные аэраторы	Actirotor	1,6–1,8	1,2–1,4
	Щетки	1,6–1,8	1,2–1,4

1.3. Осветление обработанной воды

1.3.1. Функции осветлителя

Хорошее функционирование очистных сооружений с использованием активного ила требует тщательного отделения обработанной воды от массы ила для того, чтобы на выходе получить осветленную воду, соответствующую нормам сброса загрязнений. Разделение твердой и жидкой фаз традиционно выполняется осаждением под действием силы тяжести во вторичном отстойнике, или осветлителе, даже если возможно применение других (более дорогостоящих) технологий, таких как флотация.

Таким образом, осветлитель является существенной составной частью системы очистки сточных вод с использованием активного ила. Он должен выполнять одновременно три функции:

- **функция осветления** — получение осветленной обработанной воды с содержанием ВВ, как правило, менее 20–30 мг/л, т. е. с эффективностью осветления выше 98 %;
- **функция сгущения** — получение непрерывного потока концентрированного активного ила для его возврата в биологический реактор и для обеспечения в нем заданной концентрации биомассы;
- **функция накопления** — накопление дополнительной массы ила (осадка), возникающей при кратковременной гидравлической перегрузке (в частности, в дождливый период).

В случае невыполнения хотя бы одной из этих функций частицы осадка будут выноситься из осветлителя вместе с выходящей водой, что вызовет двоякие последствия: ухудшение качества очищенной воды по ВВ, ХПК, БПК, содержанию азота и фосфора и снижение эффективности биологической обработки вследствие неуправляемого снижения концентрации активного ила в аэротенке.

Выполнение осветлителем трех вышеуказанных функций зависит от различных факторов. Наиболее важные из них при расчете его параметров — расход поступающей на очистку сточной воды и характеристики получаемого осадка (его способность к отстаиванию и сгущению). Другие факторы, такие как гидравлические и физические характеристики сооружений, конструкция зоны дегазации между биологическим реактором и осветлителем, особенно для реакторов большой глубины (свыше 7 м), также играют роль, в частности, для получения более низкой концентрации ВВ в очищенной воде.

1.3.2. Расчет параметров осветлителя

Расчет параметров вторичного отстойника возможен при наличии следующих данных: площадь сооружения, глубина сооружения и скорость рециркуляции ила.

Общие правила расчета, приведенные ниже, согласуются с рекомендациями по ATV (нем. *Abwassertechnischen Vereinigung e. V.*, версия 2000). Эти правила применяются как для круглых, так и для прямоугольных осветлителей. Тем не менее опыт показывает, что гидравлические характеристики прямоугольного сооружения уступают характеристикам круглого сооружения, и поэтому в его расчет должен вводиться некоторый коэффициент запаса.

■ Площадь сооружения

Площадь осветлителя определяется исходя из допустимой поверхностной гидравлической нагрузки, $m^3/(m^2 \cdot ч)$, обычно называемой восходящей скоростью $V_{\text{в}}$, м/ч, и определяемой по формуле

$$V_a = \frac{500}{C_{\text{вв}} I_B},$$

где

$C_{\text{вв}}$ — концентрация ВВ на входе в осветлитель, г/л,

I_B — иловый индекс, мл/г (объем ила VD30, содержащий 1 г ВВ, после 30 мин отстаивания 1 л образца в мерном стакане и такого возможного разбавления, чтобы он был в интервале 100–300 мл — см. гл. 3, п. 3.1.3.3). Иловый индекс I_B эквивалентен показателю DSVI (от англ. *diluted sludge volume index* — объемный индекс жидкого осадка), часто используемому во многих англоязычных странах

Минимальная необходимая площадь отстойника $S_{\text{мин}}$, м², определяется по формуле

$$S_{\text{мин}} = \frac{Q_n}{V_a},$$

где Q_n — предельно допустимый расход подлежащей обработке сточной воды, равный максимальному расходу при сухой погоде или во время дождей, в зависимости от конкретного случая, м³/ч

Из приведенных формул следует, что площадь сооружения будет тем больше, чем выше расчетное значение илового индекса и/или концентрация ила в аэротенке. И наоборот, объем аэротенка будет тем меньше, чем выше концентрация активного ила в нем. Поэтому имеет смысл проводить расчет экономической оптимизации для сочетания аэротенк-осветлитель путем варьирования концентрации $C_{\text{вв}}$.

При расчете параметров осветлителя основной целью является получение осадка ВВ в воде на выходе из очистных сооружений менее 20 мг/л и хорошо флокулированного осадка. Следует, однако, заметить, что содержание ВВ связано не только с восходящей скоростью и индексом I_B , но и с конструктивными особенностями осветлителя и со структурой флокул осадка

Зная о том, как сложно предвидеть характеристики флокуляции осадка (зависящие от создаваемых для бактерий экологических условий), трудно определить с достаточной точностью эффективность работы вторичного отстойника как осветлителя и, следовательно, реальную концентрацию ВВ в очищенной воде, которая в любом случае должна быть в интервале 5–30 мг/л

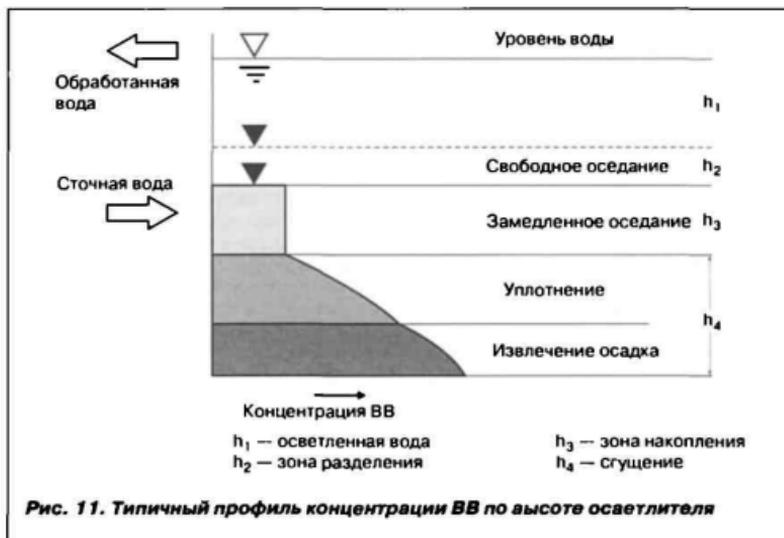
■ Глубина сооружения

Глубина осветлителя также в большой мере определяет его эффективное функционирование. Она устанавливается по эмпирическим правилам и на основе следующего принципа: по высоте сооружение разделяется на четыре последовательные зоны, каждая из которых выполняет свою функцию (рис. 11):

- h_1 — зона осветленной воды;
- h_2 — зона разделения или свободного осаждения,
- h_3 — зона накопления осадка (резерв для дождливой погоды), размер которой соответствует потоку разбавленной иловой смеси из аэротенка,
- h_4 — зона сгущения и извлечения осадка

Сумма четырех величин $h_m = h_1 + h_2 + h_3 + h_4$ представляет общую глубину сооружения. Для круглого сооружения с наклонным дном она соответствует высоте, измеренной на расстоянии $1/3$ радиуса от внешней стенки

На практике высоту h_1 принимают равной 0,50 м. Высоты h_2 , h_3 и h_4 рассчитывают для максимального расхода сточных вод и соответствующего расхода рециркулирующей. Они зависят также от концентрации ила $C_{\text{вв}}$ и индекса I_B . Кроме того, высота h_4 связана с максимальным временем пребывания сгущаемого осадка $t_{\text{об}}$ в осветлите-



ле, которое составляет 1,0–2,5 ч в зависимости от параметров функционирования сооружений биологической обработки.

Общая высота осветлителя h_m никогда не должна быть менее 3 м для сооружений диаметром 20 м и более. При диаметре меньше 20 м высота h_m должна превышать 2,5 м.

■ Степень рециркуляции

Максимальную концентрацию ила у дна осветлителя $C_{гр\max}$, г/л, определяют по формуле

$$C_{гр\max} = (1000/l_B) \sqrt[3]{t_{лн}}$$

Величина $C_{гр}$ позволяет рассчитать минимальную степень рециркуляции ила R_{min} в зависимости от различных гидравлических режимов по формуле $R_{min} = C_{ба}/(C_{гр\max} - C_{ба})$. В полученную величину рекомендуется ввести коэффициент запаса, чтобы учесть эффект разбавления ила водой в процессе его забора из осветлителя (скребковой системой или илососом).

Учитывая, что величина расхода поступающей на очистные сооружения сточной воды колеблется в течение суток между минимальным и максимальным значениями, расход рециркуляции ила должен по возможности регулироваться в определенном диапазоне, и поэтому выбор насосного оборудования должен обеспечивать такую гибкость функционирования.

■ Практическое применение

Понятие массовой нагрузки, хотя оно и не упоминалось явно в правилах расчета параметров ATV, также должно учитываться при расчете функционирования осветлителя. Массовая нагрузка соответствует общему количеству ВВ, поступающих

Таблица 3
Типичные параметры работы осветлителей

Величина нагрузки	Концентрация ила, г/л	$l_{\text{в}}$, мл/г	Восходящая скорость, м/ч		Массовая нагрузка, кг/(м ² ·ч)		Глубина сооружения, $h_{\text{ос}}$, м
			средняя	максимальная	средняя	максимальная	
Средняя	2,5	180	0,5	1,10	2,20	4,80	3,80
Низкая	4	150	0,4	0,80	3,40	5,80	4,35
Низкая с дополнительной дефосфатацией	4,5	130	0,4	0,85	3,90	6,70	4,10

в осветлитель (включая рециркуляцию), в расчете на единицу площади отстаивания и выражается в килограммах ВВ в час на квадратный метр [кг ВВ/(м²·ч)].

В табл. 3 приведены типичные условия функционирования осветлителей и их глубина, рекомендуемые для различных режимов работы сооружений биологической очистки сточных вод активным илом.

1.3.3. Технологические аспекты

■ Труба подачи

Обычно называемое *clifford* (англ.) и выполняемое в виде центральной трубы устройство подачи воды в осветлитель должно обеспечивать равномерное распределение ила в нем и рассеивать энергию, которой обладает поток из азротенка или дегазатора.

■ Отбор осадка со дна осветлителя

Устройства, выполняющие данную функцию, должны обеспечивать управляемый возврат уплотненного ила в биореактор и ограничивать время пребывания ила в отстойнике ($t_{\text{ос}}$ максимальное). Чтобы ограничить это время, используются различные технические решения.

- **ограничение размера осветлителей** со скребковой системой до максимум 30–35 м в зависимости от ряда параметров (температура, нагрузка и т. д.);
- **увеличение уклона дна**, позволяющее скребкам быстрее сдвигать ил в приямок, или, что еще лучше, **отсасывание ила**, теоретически позволяющее извлекать ил после каждого прохода скребка, каков бы ни был размер осветлителя (см гл. 10, различные осветлители компании «Дегремон»).

■ Отвод очищенной воды

При отводе осветленной воды оседающие вещества не должны попадать в сливной лоток. Для этого требуется, чтобы слой осадка удерживался ниже зоны осаждения, а поток воды на гребне водослива не превышал 15–20 м³/ч на 1 пог. м сливного лотка.

1.4. Типы и конструкции реакторов с активным илом

Общие характеристики реакторов с активным илом (часто называемых также биореакторами) были описаны в гл. 4, п. 1.6. В п. 1.4.1 даются определения специаль-

ных типов реакторов, используемых для обработки сточных вод активным илом, а также рассматривается влияние гидравлической схемы реактора на параметры очистки независимо от критериев нагрузки и возраста ила. Основные процессы обработки сточных вод активным илом, обычно используемые компанией «Дегремон», рассматриваются в п 1.4.2

1.4.1. Типы реакторов

■ Реактор с полным перемешиванием

По определению это реактор в виде бассейна с полностью однородным содержанием, в любой точке которого отмечаются одинаковые концентрации микроорганизмов, растворенного кислорода и остаточного субстрата (рис. 12)

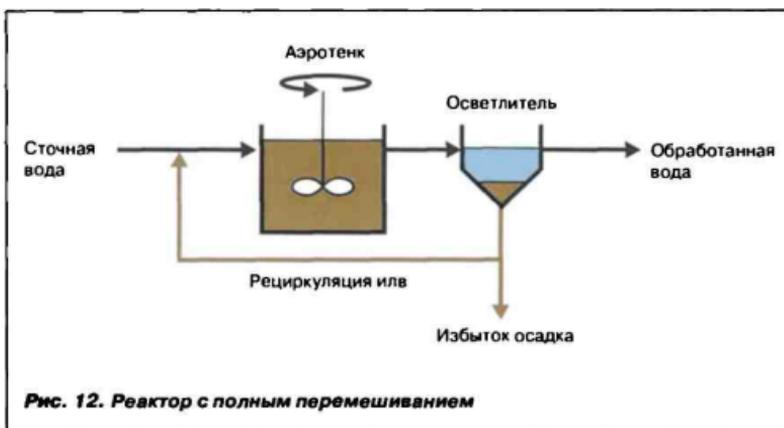


Рис. 12. Реактор с полным перемешиванием

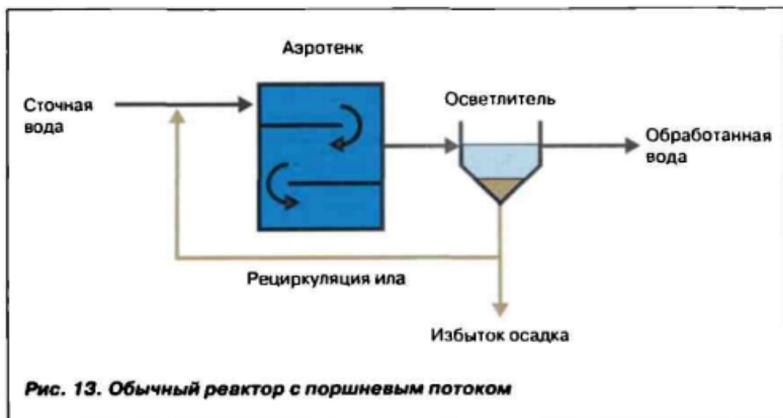
Поступающая смесь сточных вод и активного ила немедленно распределяется по реактору, из которого отводится уже обработанная вода. Преимущества реактора с полным перемешиванием заключаются в устойчивости (в известных пределах) его работы при перегрузках и случайных поступлениях токсичных веществ

С другой стороны, низкая концентрация субстрата, доступного микроорганизмам в окружающей их среде, способствует росту нитчатых бактерий и вызывает проблему вспухания ила (вспухание вследствие низкой пищевой нагрузки — англ. *low F/M bulking*)

■ Реактор с поршневым потоком

Поступающая сточная вода и рециркулируемый ил подаются на вход аэротенка, оборудованного с помощью перегородок как канал большой длины (рис. 13)

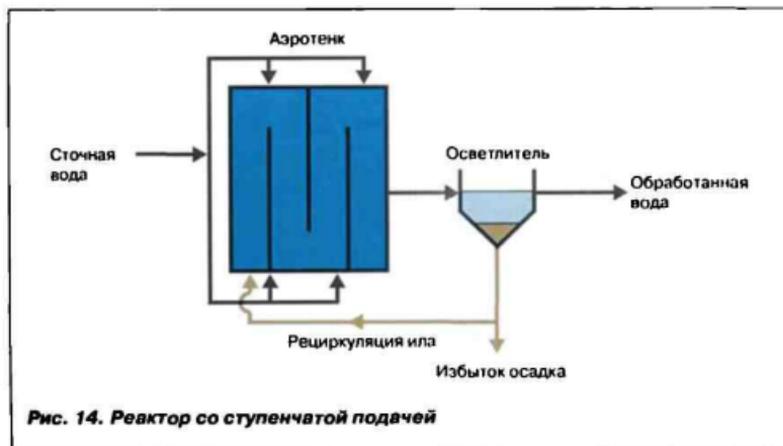
Концентрация субстрата в жидкости и потребность активного ила в кислороде изменяются по всей длине потока. Поэтому установленная интенсивность аэрации естественно снижается от входа в аэротенк к выходу из него. Такой тип реактора предназначен, прежде всего, для крупных очистных сооружений



Поскольку в начальной зоне реактора имеет место большая нагрузка по загрязнению, рост большинства нитчатых бактерий ограничен и способность ила к отстаиванию повышается при условии поддержания достаточной концентрации растворенного кислорода.

■ Реактор со ступенчатой подачей

Реактор со ступенчатой подачей представляет собой модификацию реактора с поршневым потоком. В нем поступающая жидкость вводится в различных точках азротенка, состоящего из ряда параллельных отсеков (иногда называемых коридорами). Рециркулируемый ил полностью поступает только на вход в азротенк, т.е. в первый отсек (рис. 14)



В результате массовая нагрузка и потребность в кислороде распределяются гораздо лучше, чем в реакторе с поршневым потоком. Концентрация активного ила уменьшается от начала аэротенка к выходу из него таким образом, что при одной и той же концентрации ВВ на входе в осветлитель масса ила в реакторе со ступенчатой подачей значительно выше, чем в реакторе с поршневым потоком

■ Циркуляционный канал, или реактор с замкнутым циркуляционным контуром

Реактор с замкнутым циркуляционным контуром был разработан на основе замкнутого канала овальной формы, оборудованного горизонтальными аэраторами, которые располагаются в нескольких местах (канал окисления). Такое расположение приводит к существенным изменениям содержания растворенного кислорода по длине канала и к созданию условий для реакций денитрификации (рис. 15)

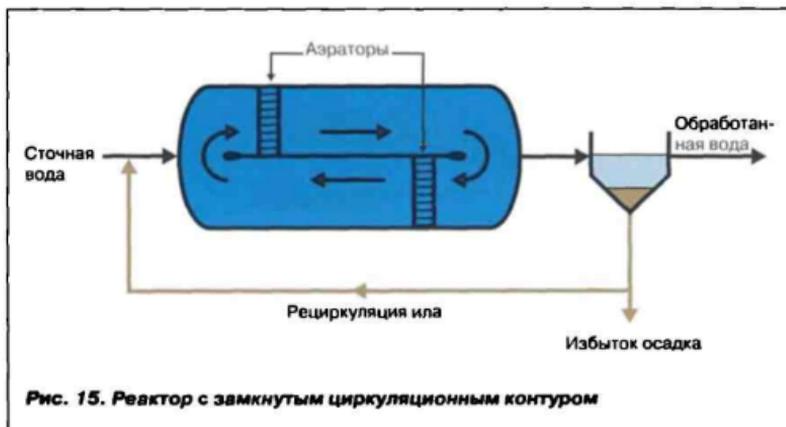


Рис. 15. Реактор с замкнутым циркуляционным контуром

В настоящее время такие реакторы строят также в виде кольца с аэрацией сжатым воздухом и механическим перемешиванием, обеспечивающим минимальную скорость циркуляции 0,30 м/с. В таком виде они похожи на реакторы с полным перемешиванием.

■ Частный случай: селектор для подавления нитчатых микроорганизмов

«Селектор для подавления нитчатых микроорганизмов», во Франции часто называемый зоной контакта, — это реактор, используемый в сочетании с некоторыми из описанных выше типов реакторов. Он появился благодаря исследованиям Я. Худобы (J. Chudoba, 1973), нацеленным на предотвращение вспухания активного ила и повышение его способности к отстаиванию.

Принцип работы селектора состоит в создании условий высокой концентрации растворенного питательного субстрата, которые стимулируют скорость поглощения и запасаения субстрата микроорганизмами, не образующими нитей. Такие микроорганизмы размножаются с большей скоростью, чем нитчатые микроорганизмы, что позволяет им стать доминирующими видами.

На практике это означает, что непосредственно перед азотенком необходимо установить резервуар малого объема (селектор), в котором осуществляется смешивание рециркулируемого ила и подлежащих обработке сточных вод.

Расчет селектора основан на двух параметрах: времени контакта при максимальном расходе (около 10 мин) и нагрузке по быстро ассимилируемой части ХПК, выраженной в миллиграммах (около 100 мг ХПК на 1 г ВВ), в упомянутой зоне.

Используются различные селекторы, которые могут действовать в аэробных, анаэробных и анаэробных условиях, с различной эффективностью в зависимости от причины проблем, возникающих при эксплуатации.

1.4.2. Основные способы использования технологии активного ила

Азотенки, предназначенные для **удаления БПК**, являются классическими и не требуют особых комментариев. Это реакторы с полным перемешиванием или с поршневым потоком (и их модификации), которые работают при средней, большой и даже очень большой нагрузке в зависимости от требуемой эффективности очистки и снабжены системами непрерывной азотации.

Ниже рассматриваются только некоторые технологии (способы) с активным илом, используемые компанией «Дегремон» для **удаления азота** (нитрификация и денитрификация) или для **одновременного удаления азота и фосфора**.

■ Двухзонная технология

В этой широко распространенной технологии (рис. 16) исходная сточная вода подается в анаэробную зону (без азотации), а затем она направляется в зону с периодической или непрерывной азотацией. Образовавшиеся нитраты возвращаются в анаэробную зону частично за счет рециркуляции ила, частично благодаря внутренней рециркуляции иловой смеси. В зависимости от требуемой эффективности денитрификации объем внутренней рециркуляции может составлять 150–350 % от объема исходной сточной воды.

Эффективность денитрификации зависит от времени пребывания в анаэробной зоне и особенно от быстрорастворимой доли БПК в исходной сточной воде. Отношение БПК к количеству азота по Кельдальду (NK) в исходной сточной воде, равное 4–1, достаточно для получения на выходе из сооружений концентрации нитра-

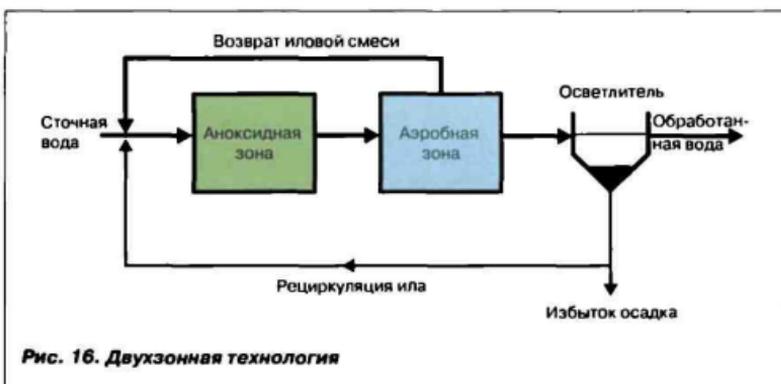


Рис. 16. Двухзонная технология

тов 5–7 мг/л и для обеспечения нормы сброса 10 мг/л общего азота при обработке разбавленной исходной сточной воды (максимальное содержание НК 40 мг/л)

При большей концентрации НК и меньшем отношении БПК к НК эффективность денитрификации при реализации способа двухзонной обработки ограничена, что определяет предельно достижимый уровень общего азота на выходе из сооружения

■ Трехзонная технология

Двухзонная технология дополняется третьей зоной, называемой эндогенной и располагаемой после зоны с аэрацией (рис 17) Эта третья зона оборудована системой аэрации периодического действия и отдельным устройством для перемешивания Рециркуляция иловой смеси на вход аноксидной зоны выполняется путем возвращения иловой смеси из зоны аэрации

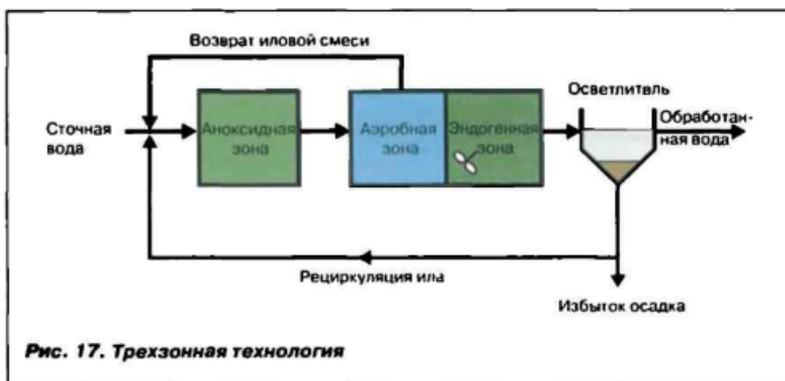


Рис. 17. Трехзонная технология

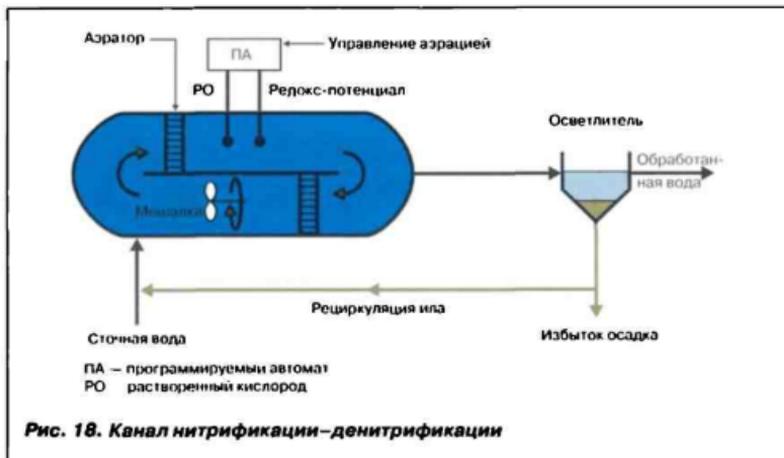
Расчет параметров аноксидной зоны производится так, чтобы обеспечить максимально возможную денитрификацию нитратов, допускаемую величиной быстро-разлагаемой части БПК (с учетом растворенного в иловой смеси кислорода) Полное же завершение денитрификации происходит в процессе эндогенного окисления в эндогенной зоне реактора

Трехзонная технология обладает многими достоинствами

- достигается повышенная эффективность денитрификации даже при низких концентрациях общего азота,
- возможна эффективная очистка сточных вод с большим содержанием НК и/или низким отношением БПК/НК,
- уменьшается степень внутренней рециркуляции благодаря более высокой концентрации рециркулируемых нитратов по сравнению с их концентрацией в очищенной воде.

■ Канал нитрификации–денитрификации

В таком варианте применения канал (рис 18) функционирует с чередованием аэробных и аноксидных условий, что обеспечивается периодическим включением аэрации и поддержанием минимальной скорости циркуляции в сооружении при помощи погружной мешалки



Работа системы азации регулируется по данным измерения окислительно-восстановительного (редокс) потенциала и, возможно, концентрации растворенного кислорода. Редокс-потенциал позволяет определять длительность периодов азации и аноксии, которые чередуются в течение суток. Во время остановки азации нитраты восстанавливаются до азота в процессе «смешанной» денитрификации. Их исчезновение сопровождается резким падением величины редокс-потенциала. При достижении его нижнего порога запускается система азации.

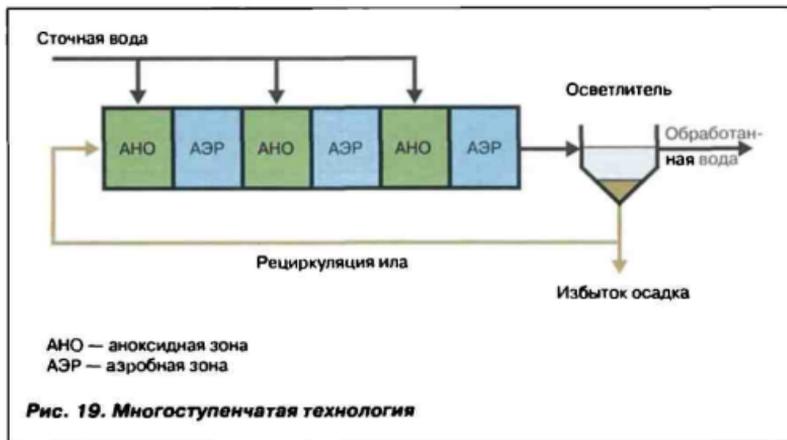
Число и продолжительность циклов включения и выключения азации в течение суток меняется в зависимости, прежде всего, от нагрузки по поступающему азоту. Как правило, длительность азации варьируется от 12 до 18 ч в сутки, в среднем примерно 14 ч.

Преимущество такой технологии состоит в возможности ее адаптации к сточным водам с переменными характеристиками. При правильно рассчитанных параметрах она позволяет снизить концентрацию нитратов до 4–7 мг/л. Перед входом в канал нитрификации-денитрификации настоятельно рекомендуется встраивать контактный резервуар (типа реактора с полным перемешиванием) для того, чтобы снизить риск развития нитчатых бактерий.

■ Многоступенчатая технология

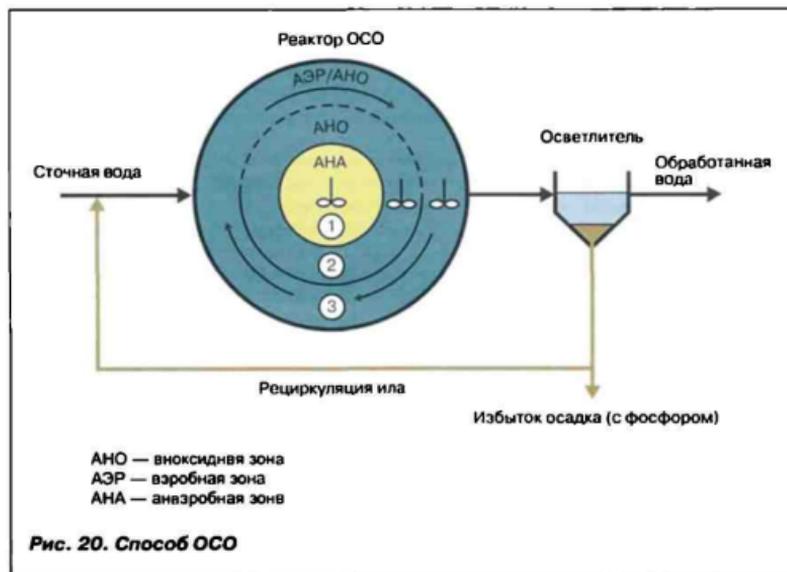
Многоступенчатая технология (рис. 19) реализуется в реакторе с несколькими (двумя, тремя, даже четырьмя) последовательными аэрируемыми и аноксидными зонами. Она предусматривает описанную выше многоступенчатую подачу исходной сточной воды, причем распределение последней происходит только между аноксидными зонами, чтобы внести в них необходимый для денитрификации органический углерод.

Конструкция такого реактора может быть симметричной, т. е. с аноксидными и аэробными отсеками равного объема и с равномерным распределением исходной сточной воды, либо несимметричной — такой, чтобы извлечь максимум от повышенной концентрации ВВ в начале процесса. Многоступенчатая конфигурация позволяет уменьшить и даже полностью исключить внутреннюю рециркуляцию ило-



вой смеси благодаря тому, что нитраты, образованные на одной ступени, восстанавливаются на следующей ступени (за исключением последней).

Учитывая сложность многоступенчатых реакторов, их чаще всего применяют для очистных сооружений большой мощности (см. пример южного Милана, гл. 23).





Очистные сооружения в Оддере (Дания).
Производительность 18 000 м³/сут

Очистные сооружения в Сквингв (Дания).
Производительность 17 000 м³/сут

Фото 10. Очистные сооружения по способу ОСО

■ Способ ОСО

Способ **ОСО** (рис. 20) получил свое название по оригинальной конфигурации реактора, который состоит из трех сообщающихся концентрических зон — анаэробной, аноксидной и аэробной, предназначенных для удаления азота и биологической дефосфатации. В каждой зоне имеется мешалка, создающая горизонтальное течение. Воздушные диффузоры установлены только в одной половине кольцевой зоны (3).

В отличие от обычных технологий в способе **ОСО** внутренняя рециркуляция нитратов обеспечивается не перекачиванием (насосами), а управлением потока иловой смеси между двумя аноксидными зонами и аэробной зоной при помощи погружных мешалок. Такое техническое решение делает способ **ОСО** менее энергоемким.

Круглая форма бассейна **ОСО** в сочетании с полукруглой внутренней перегородкой позволяет создать два относительно независимых циркуляционных потока в зонах (2) и (3) и управлять перемешиванием потоков между этими двумя зонами в той части, где нет разделительной перегородки.

Чтобы обеспечить достаточную внутреннюю рециркуляцию между аноксидной и аэробной зонами, условия аэрации (длительность, интенсивность) и перемешивания определяются запрограммированными и адаптируемыми циклами.

Значительными преимуществами способа **ОСО** являются его гибкость функционирования, превосходные показатели денитрификации и биологической дефосфатации, а также многочисленные успешные реализации. Важность соблюдения гидравлических параметров сооружений делает возможным применение этого способа преимущественно на очистных сооружениях малой и средней производительности.

■ Способ «ISAH»

Способ «ISAH» близок к способу «JHB» (см. гл. 4, п. 2.1.4.3), в котором на линии рециркуляции ила из осветлителя установлен эндогенный денитрификатор, позволяющий снизить концентрацию нитратов в аэробной зоне.

Способ «ISAH» (рис. 21) отличается добавлением внутренней рециркуляции между анаэробной и первой аноксидной (эндогенной) зонами, что позволяет использовать углеродный субстрат и улучшить восстановление нитратов. Эта схема была использована на очистных сооружениях города Брно, Чешская Республика (см. гл. 23).

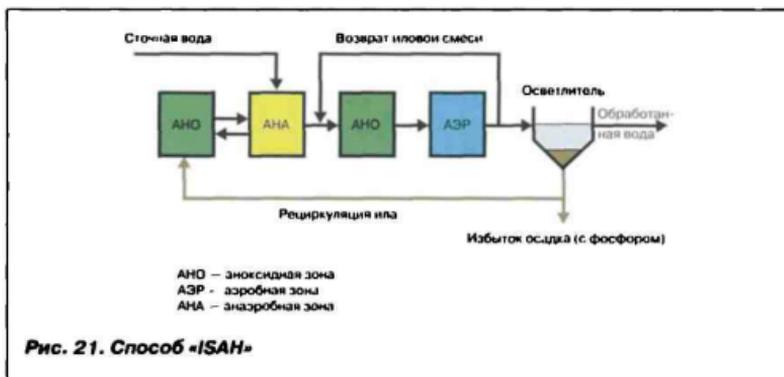


Таблица 4
Критерии выбора способов удаления азота

	50 000 ЭЖ, содержание общего азота в очищенной воде 15 мг/л			150 000 ЭЖ, содержание общего азота в очищенной воде 10 мг/л		
	Пример А ¹	Пример В ¹	Пример С ¹	Пример А ¹	Пример В ¹	Пример С ¹
Исходная БПК, мг/л	300	250	150	300	250	150
Концентрация исходного НК, мг/л	75	45,5	37,5	75	45,5	37,5
Отношение БПК к НК	4	5,5	4	4	5,5	4
Концентрация N-NO ₃ , подлежащего денитрификации, мг/л	46	20	18	51	25	23
Потенциал анноксидной денитрификации, мг/л	40	33	20	40	33	20
Достаточно ли предварительной анноксидной зоны	Нет	Да	Да	Нет	Да	Нет
Требуемая степень рециркуляции	4	1,9	1,7	8	4,2	3,3
Необходимость эндогенной зоны	Да	Нет	Нет	Да	Нет	Да
Рекомендованная конфигурация ² сооружений	А/ОЕ (А/О/Е)	А/О	А/О	(А/О/Е)	А/О (А/О/Е)	А/ОЕ

¹ Обозначение примеров буквами А, В или С дано в соответствии с величиной исходной БПК

² Технология А/О – двухзонаная, А/ОЕ – двухзонаная с периодической аэрацией, А/О/Е – трехзонаная. Технология типа циркуляционного канала может применяться во всех случаях.

■ Выбор технологии

Учитывая многочисленность и разнообразие существующих в настоящее время способов и технологий с использованием активного ила, часто бывает трудно сделать выбор наиболее подходящего из них. Помимо прочих параметров, при этом выборе должны учитываться состав исходных сточных вод, установленные нормы сброса очищенной воды и допустимый размер сооружений.

В табл. 4 сведены в качестве примера критерии, помогающие сделать выбор технологии удаления азота.

1.5. Биореакторы последовательного действия

1.5.1. Общие сведения

Биореакторы последовательного действия более известны под английским названием *sequencing batch reactors (SBR)* (во Франции используется сокращение RBS — от фр. *reacteur biologique sequentiel*). Процесс биологической обработки осуществляется в одном реакторе с полным перемешиванием, в котором последовательно производится аэрация и затем осветление. Отсюда и название реакторов — «последовательные». Отстаивание ила происходит во время остановки аэрации, а чтобы удалить отстоявшуюся воду, используется устройство для слива. Различные стадии обработки выполняются через заранее определенные и запрограммированные промежутки времени и образуют полный цикл.

Типичный цикл состоит из пяти последовательных операций, объединенных в три фазы процесса обработки (рис. 22)

- подача (исходной сточной или уже отстоянной воды) и ее биологическая обработка (аэрация/перемешивание в реакторе),
- отстаивание (отделение ила),
- опорожнение (слив очищенной воды) и затем перерыв (удаление избытка осадка)

Последняя стадия (перерыв) может быть пропущена за счет удаления избытка осадка в конце периода опорожнения. Указанная продолжительность операций обработки в процентах от общей длительности цикла приведена на рис. 22 лишь в качестве примера. Цикл может продолжаться от 4 до 12 ч, и даже дольше для некоторых ПСВ. Длительность цикла меняется в зависимости от концентрации поступающих сточных вод и поставленной цели обработки: удаление только углерода, либо углерода и азота, либо еще и фосфора.

В этом одном биореакторе подача сточных вод и выпуск очищенной воды осуществляются периодически. Чтобы сделать возможным постоянный прием сточных вод, нужно добавить второй реактор, цикл работы которого сдвинут по отношению к первому на половину полного цикла (для случая, показанного в примере). А чтобы непрерывно был отвод очищенной воды, требуется не меньше четырех реакторов.

Совокупность параметров, свойственных для технологий с использованием активного ила (объемная нагрузка, массовая нагрузка, возраст ила), также применима и к биореакторам последовательного действия, даже притом что их биологические и гидравлические режимы работы несколько различаются.

На основе базового принципа биореактора последовательного действия было разработано множество технологий с периодическим опорожением реактора. Ранее применявшаяся лишь на малых и средних очистных сооружениях, эта технология используется теперь и в крупных городах (свыше 1 млн ЭЖ).

Преимущества и недостатки такой технологии приведены ниже.

Преимущества

- принципиальное отсутствие вторичных отстойников и рециркуляции ила,
- устойчивость к колебаниям расхода и загрязненности поступающих сточных вод;
- превосходные условия для осветления, в частности хороший контроль времени аноксии и даже анаэробнобиоза во время отставания ила, что в результате дает хороший иловый индекс и малое содержание ВВ в осветленной воде;
- простота и компактность конструкции, что дает значительный выигрыш при строительстве

Недостатки.

- необходимость в усиленной сети распределения воздуха, поскольку время аэрации в каждом реакторе ограничено,
- необходимость использования сложной и высокопроизводительной системы опорожнения,
- риск появления плавающих примесей и необходимость в специальном устройстве для их удаления.

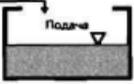
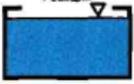
Операция	Занятый объем, % от общего	Длительность операции, % от длительности цикла	Фаза цикла	Цель операции	Аэрация
1	60–100	33		Внесение субстрата (денитрификация)	Есть или нет (по выбору)
2	100	33		Окисление углерода (и нитрификация)	Есть
3	100	16		Осветление	Нет
4	100–65	14		Выпуск очищенной воды	Нет
5	65–60	4		Избыток осадка	Нет

Рис. 22. Типичный цикл биореактора последовательного действия

Компания «Дегремон» уже давно начала разрабатывать системы последовательной обработки, в первую очередь с реакторами постоянного уровня воды, применяемые на малых очистных сооружениях: **Diapac UI**, затем **Alter 3** (70–80-е гг.). Наконец, признав преимущества систем, работающих в циклическом режиме (90-е гг.), компания «Дегремон» предлагает сегодня две системы подобного типа

- **Bio-S** (см. п. 3.1, компактные стандартные установки) — для малых станций;
- **Cyclor** (рассматривается ниже) — для средних и крупных очистных сооружений

1.5.2. Установка Cyclor

Установка **Cyclor** состоит, как минимум, из двух реакторов, что позволяет обеспечить непрерывность приема сточных вод. Каждый из этих реакторов имеет цилиндрическую или прямоугольную форму и характеризуется переменным уровнем воды в нем.

1.5.2.1. Главные фазы цикла обработки

Последовательные фазы обработки сточной воды в одном реакторе установки **Cyclor** проходят в следующем порядке (рис. 23)

- **заполнение реактора и аэрирование (фаза I)**, исходная сточная вода поступает в распределитель (зона с поршневым потоком на входе в реактор), где она входит в контакт с частью циркулирующего ила. Уровень жидкости в реакторе поднимается, и запускается аэрация. На этой стадии протекают различные био-

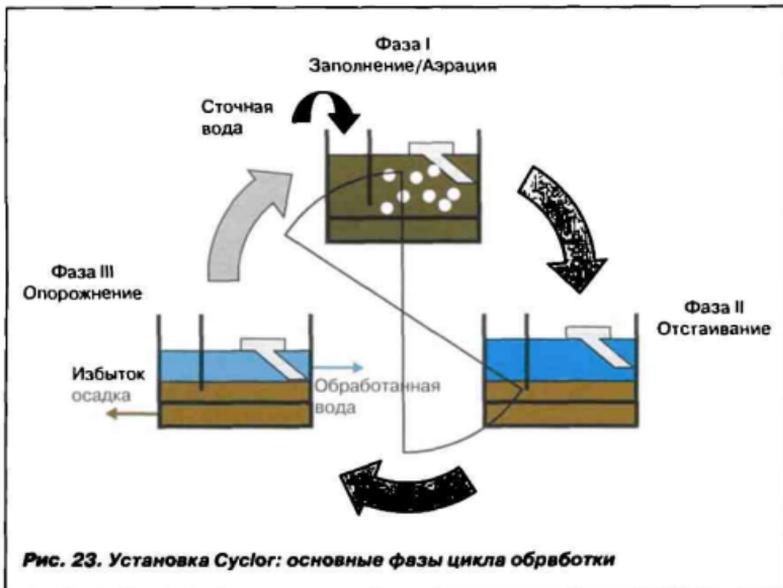


Рис. 23. Установка Cyclor: основные фазы цикла обработки

логические реакции окисление углерода и нитрификация во время аэрации, денитрификация во время возможной остановки аэрации (что всегда допустимо), — **отстаивание (фаза II)**: аэрация и рециркуляция ила остановлены. Именно в этот период времени происходит статическое осаждение ила, а также эндогенная денитрификация на накопленном биологическом субстрате, — **опорожнение реактора (фаза III)**. после отстаивания осветленная вода отводится с помощью специального подвижного устройства, при этом отстаивание ила и эндогенная денитрификация в его флоккулах продолжают. В конце периода опорожнения удаляется избыточный объем осадка

1.5.2.2. Главные элементы реактора Cuslor

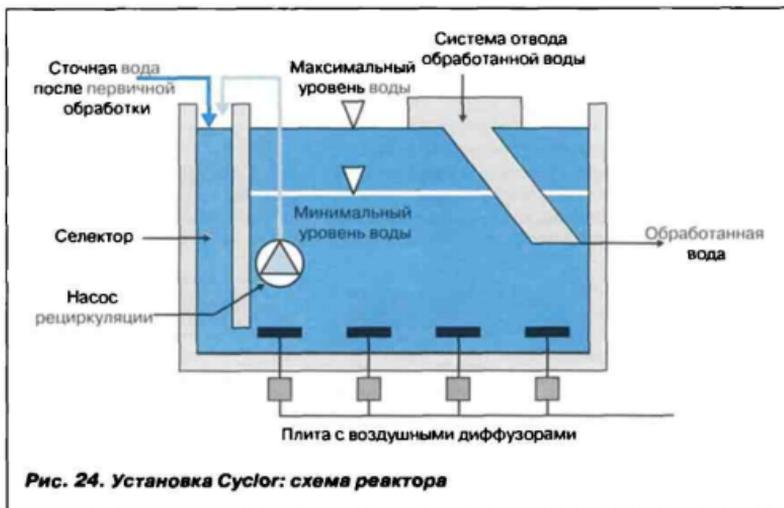


Рис. 24. Установка Cuslor: схема реактора

■ Селектор для подавления нитчатых микроорганизмов

Поступающая сточная вода попадает в зону селектора для подавления нитчатых микроорганизмов (зона с поршневым потоком), где осуществляется контакт с частью ила, рециркулированного из реактора с помощью погружного насоса.

Правильный подбор параметров работы селектора (поршневой поток, время пребывания) позволяют:

- снизить риск всплывания ила, препятствуя развитию нитчатых бактерий, и улучшить отстаиваемость ила;
- способствовать реакциям денитрификации и биологической дефосфатации

■ Расположение диффузоров на дне реактора

Подача воздуха в реактор осуществляется с помощью сети воздушных диффузоров, создающих мелкие и средние пузыри и расположенных на полу реактора. Управление аэрацией происходит по данным измерения концентрации растворен-

ного кислорода в реакторе **Cyclor** и с учетом контрольных значений, заложенных в программу управления

Стандартный реактор **Cyclor** не оборудован мешалкой. Перемешивание в бассейне осуществляется подаваемым воздухом, а поддержание ила во взвешенном состоянии во время завершающей фазы аноксии обеспечивается равномерными кратковременными включениями аэрации. Предусмотрена возможность установки погружной мешалки

■ Система отвода обработанной воды

Оборудование, обеспечивающее отвод обработанной порции воды, имеет первостепенную важность для нормального функционирования реактора **Cyclor**. Оно должно справляться с отводом очищенной воды за время, предназначенное для опорожнения реактора, не захватывая при этом плавающие частицы и не всасывая ил из слоя ниже уровня осветленной воды

Реакторы **Cyclor** оборудованы системой отвода обработанной воды через плавающий перелив по патентованной компанией «Дегремон» технологии (свыше 50 примеров реализации)

Устройство отвода всегда находится на поверхности воды, и в начале фазы опорожнения, и в момент ее завершения. Минимальный допустимый уровень воды устанавливается таким образом, чтобы оставалось достаточное расстояние до верхней части слоя осадка во избежание его засасывания вместе с обработанной водой

Система отвода воды (фото 11, рис. 25) состоит:

- из плавающего устройства,
- из перелива с сифонной перегородкой, расположенного ниже поплавка,
- из жесткой трубы на шарнирах для отвода обработанной воды (гравитационным потоком)



Фото 11. Очистные сооружения в Ара Анерланд (Швейцария)



Рис. 25. Система отвода очищенной воды

За исключением фазы опорожнения система обработки сточной воды остается изолированной благодаря пневматической блокировке, т.е. блокировке введением воздуха. Сформированный слой воздуха под поплавком делает зону обработки сточной воды герметичной и предотвращает попадание ила в нее. С началом фазы опорожнения открывается электровентиль сброса пневмоблокировки, что приводит к началу отвода обработанной воды

Во время опорожнения реактора плавающее устройство отвода воды опускается вместе с уровнем воды. В конце опорожнения и перед следующей фазой заполнения реактора его пневматическая блокировка возобновляется.

Такая система отвода обработанной воды специально разработана для способа **Cyclor**, не происходит захвата плавающих частиц (сифонная перегородка находится на 10 см ниже уровня воды), для введения системы в действие или ее блокировки не используются электромеханические узлы.

Расход отводимой обработанной воды меняется в зависимости от высоты уровня воды в реакторе: сначала он большой, а затем уменьшается по мере приближения уровня воды к слою осадка. Таким образом, расход отводимой воды зависит от уровней воды в начале и в конце фазы опорожнения, от высотной отметки сливного конца отводной трубы и последующих гидравлических ограничений на очистных сооружениях.

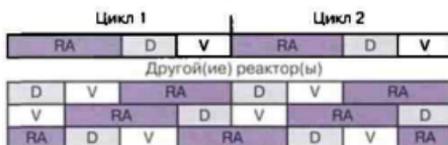
Системы для отвода воды производятся четырех размеров с единичным расходом от 250 до 1200 м³/ч. Разумеется, в одном реакторе можно установить несколько таких систем.

■ Конструкции реакторов и длительность циклов

Форму реакторов **Cyclor**, а также их количество выбирают в зависимости от местных условий и размера очистных сооружений.

Длительность циклов программируется и адаптируется к характеристикам поступающих на обработку сточных вод. Применяются три стандартных цикла: кратковременный, средний и долговременный. Они различаются по времени, отведенному на фазу биологической обработки, а время отстаивания и опорожнения остается одинаковым. Это позволяет очищать более или менее концентрированные сточные

а) цикл 4 ч 20 мин. Конфигурация из 4 реакторов



б) цикл 6 ч 30 мин. Конфигурация из 4 реакторов



RA — заполнение + аэрация

D — отстаивание

r — реакция (аэробная или анаэробная)

V — опорожнение

Рис. 26. Реактор Cyclor: примеры циклов обработки

воды, обеспечивать более высокую надежность качества сброса, особенно по общему азоту, и приспосабливаться к неблагоприятным условиям по температуре (нитрификация в зимний период)

Кроме того, опыт показывает, что при известных условиях реактор **Cyclor** позволяет достигать высокой эффективности биологической дефосфатации

Два примера конфигурации циклов обработки показаны на рис. 26

■ Достоинства и недостатки

По сравнению с классической технологией очистки активным илом установка **Cyclor** имеет следующие **главные преимущества**

- оптимальное отстаивание ила — статическое отстаивание без гидравлических возмущений, очень хороший иловый индекс (роль зоны селектора и коротких перерывов аэрации),
- простая, удобная для строительства конструкция, существенное уменьшение размеров производственной площадки ввиду отсутствия отдельных осветлителей. Установка **Cyclor** является также приемлемым решением в случае земельных или природоохранных ограничений (необходимость закрытых сооружений), поскольку ее можно разместить между традиционными очистными сооружениями с активным илом и биофильтрами,
- модульный принцип конструкции и функционирования,
- полностью автоматизированное управление с возможностью легкой настройки длительности фаз процесса обработки.

Недостатки те же, что у всех биореакторов последовательного действия:

- необходимость создания усиленной сети распределения воздуха из-за цикличности работы реактора (ограниченное время аэрации),
- увеличенный объем реактора из-за необходимости учета пиковых гидравлических нагрузок (коэффициент неравномерности выше 3);
- в некоторых случаях появляется необходимость в дополнительном резервуаре-накопителе для проведения третичной очистки сточной воды.

1.6. Мембранный биореактор **Ultrafor**

1.6.1. Общие сведения

Биореактор **Ultrafor** — это способ и установка для биологической очистки сточных вод. Он относится к семейству биореакторов с погружными мембранами (BRM — от фр. *bioreacteur à membranes*), см. гл. 4, п. 4.

В биореакторе **Ultrafor** используются органические мембраны ультрафильтрации «Zenop 500» типа полых волокон с внешней мембранной пленкой на поддерживающей основе. Фильтрация жидкости происходит при прохождении воды через мембрану с наружной поверхности волокна к внутренней благодаря разнице давлений, создаваемой отсасывающим насосом (рис. 27).

Наружный диаметр волокна составляет 1,9 мм, внутренний — 0,9 мм. Номинальный диаметр пор — 0,04 мкм, что обеспечивает превосходный порог отсеивания загрязнений.

Кассета является первичным функциональным узлом системы ультрафильтрации. Она содержит следующие составные части (фото 12)

- элементы фильтрации (до 22 шт.) с фильтрующей поверхностью одного элемента 20,4 м²;
- детали подключения и сборки элементов фильтрации,

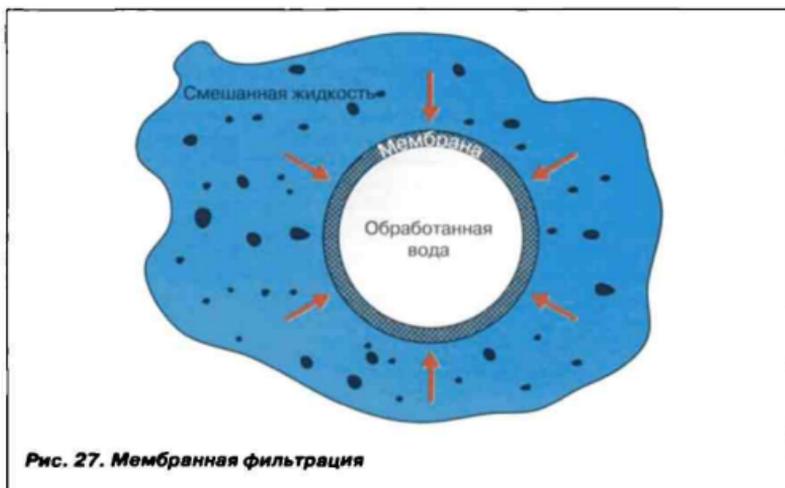


Рис. 27. Мембранная фильтрация



Фото 12. Кассета мембранного биореактора Ultrafor

- система распределения и диффузии воздуха вдоль элементов фильтрации (функция «воздух для чистки мембраны»);
- устройство крепления кассеты в биореакторе, в составе которого она будет работать

1.6.2. Принцип действия

Погруженная в глубину иловой смеси мембрана обеспечивает отделение обработанной воды от очищающей биомассы. Таким образом, мембрана заменяет традиционное осветление и возможную третичную фильтрацию.

Существует две основные конструкции установок **Ultrafor** (рис. 28 и 29):

- конструкция, в которой мембраны погружены прямо в биологический реактор (**Ultrafor I** или с встроенным мембранным блоком);
- конструкция, в которой мембраны установлены в отдельном бассейне фильтрации. В этом случае необходима

рециркуляция биологической жидкости между ним и резервуаром биореактора (**Ultrafor S** или с отдельным бассейном мембранной фильтрации)

Установка **Ultrafor** работает циклами фильтрация-промывка.

Фильтрация происходит в результате отсасывания воды или под действием силы, возникающей за счет трансмембранного давления менее 0,55 бар. Часть фи-

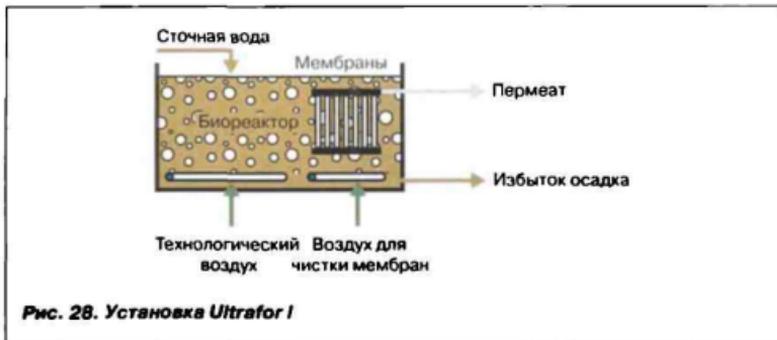


Рис. 28. Установка Ultrafor I

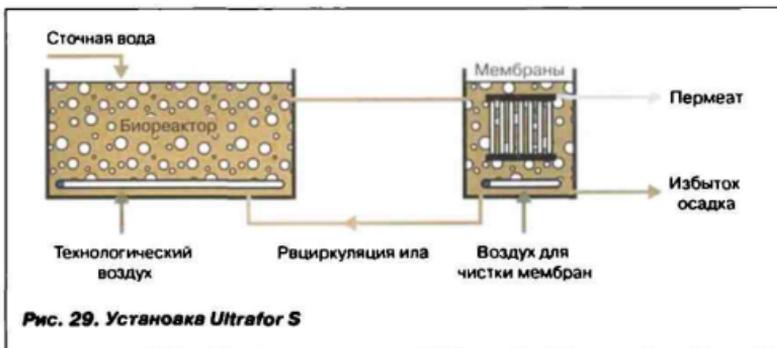


Рис. 29. Установка Ultrafor S

льтрованной воды отводится для выполнения операций по чистке мембран. Циклический барботаж воздуха (функция «воздух для чистки мембран») создает восходящий поток пузырьков воздуха вдоль волокон мембран, вызывает их вибрацию и движение прилегающей к ним жидкой смеси

Кроме того, с переменной частотой используются **разные типы специальной промывки**, позволяющие предотвратить зарастание мембран и повышение трансмембранного давления с течением времени

- обратная промывка (или англ. *backpulse*) Выполняется пропуском пермеата противотоком через волокна мембран, что обеспечивает смыв загрязнений, закрепившихся на их стенках. Длительность обратной промывки составляет около 30 с, она проводится примерно через каждые 10–15 мин работы в режиме фильтрации,

- чистка реагентами. Имеет профилактический характер и заключается в обратной промывке пермеатом с добавлением химического раствора. Длительность такой чистки составляет около 1 ч; она проводится 1 раз в 3–7 дней работы установки,

- регенерация Применяется для восстановления фильтрующей способности мембран и осуществляется путем их замачивания в химическом растворе. Длительность регенерации составляет до 24 ч, а частота применения — 1–3 раза в год.

1.6.3. Практическая реализация

Установка **Ultrafor**, как и большинство мембранных биореакторов, отличается главным образом следующими особенностями

- повышенная концентрация иловой смеси (8–12 г/л), что позволяет существенно выиграть в объеме реактора. Еще более высокие концентрации использовались раньше и сейчас продолжают использоваться, но экономически разумный оптимум с учетом всей совокупности факторов чаще всего находится в пределах 8–10 г/л.
- большой возраст ила (свыше 10 сут).
- мембраны погружены непосредственно в жидкую смесь сточной воды и активного ила

Эти особенности предполагают необходимость в определенных мерах предосторожности и ограничениях, которые требуется учитывать при проектировании и расчете параметров таких установок

■ Предварительная обработка

Предварительная обработка сточной воды является очень важным этапом для нормального функционирования мембранного биореактора.

В дополнение к тщательному удалению песка и масел необходимо эффективное процеживание. Минимальным требованием является фильтрация через сито с гидравлическим диаметром отверстий 2 мм. Кроме того, рекомендуется установка мелкого сита в контуре биологического реактора

■ Биологический реактор

Конструкция различных модификаций биологического реактора **Ultrafor** остается, за некоторыми исключениями, аналогичной классическим реакторам обработки активным илом

Три возможных типа реакторов показаны на рис. 30

Повышенная концентрация ила и применение мембран вносят, однако, существенные различия в параметры работы установки

- для получения сточной воды с хорошей фильтруемостью параметры реактора должны обеспечивать **полную и стабильную нитрификацию** (менее 1 мг/л остаточного $N-NH_4$) при наиболее напряженных условиях по нагрузке и температуре воды. Но денитрификация в пределах нормы, установленной для общего азота, необязательна, поскольку отсутствует риск всплывания ила в процессе осветления, в отличие от обычной схемы вторичного отстаивания. По сравнению с классической обработкой активным илом необходимый объем реактора уменьшен, по крайней мере, в два раза благодаря повышенной концентрации ила;
- более высокое содержание ВВ оказывает неблагоприятное воздействие на коэффициент T_p (см п. 1.2.1.3), а значит, на перенос кислорода. Это приводит к увеличению удельного потребления электроэнергии, выражаемого в киловатт-часах на 1 кг БПК, существенно превышающего показатель для обычной обработки активным илом,
- при проведении ультрафильтрации вокруг кассет происходит сгущение жидкой смеси, которым нужно управлять путем постоянной рециркуляции смеси от кассет с мембранами в аэробную и аноксидную зоны. Расход рециркуляции жидкой смеси обычно устанавливается на величине от 200 до 500 % от расхода поступающей на обработку сточной воды

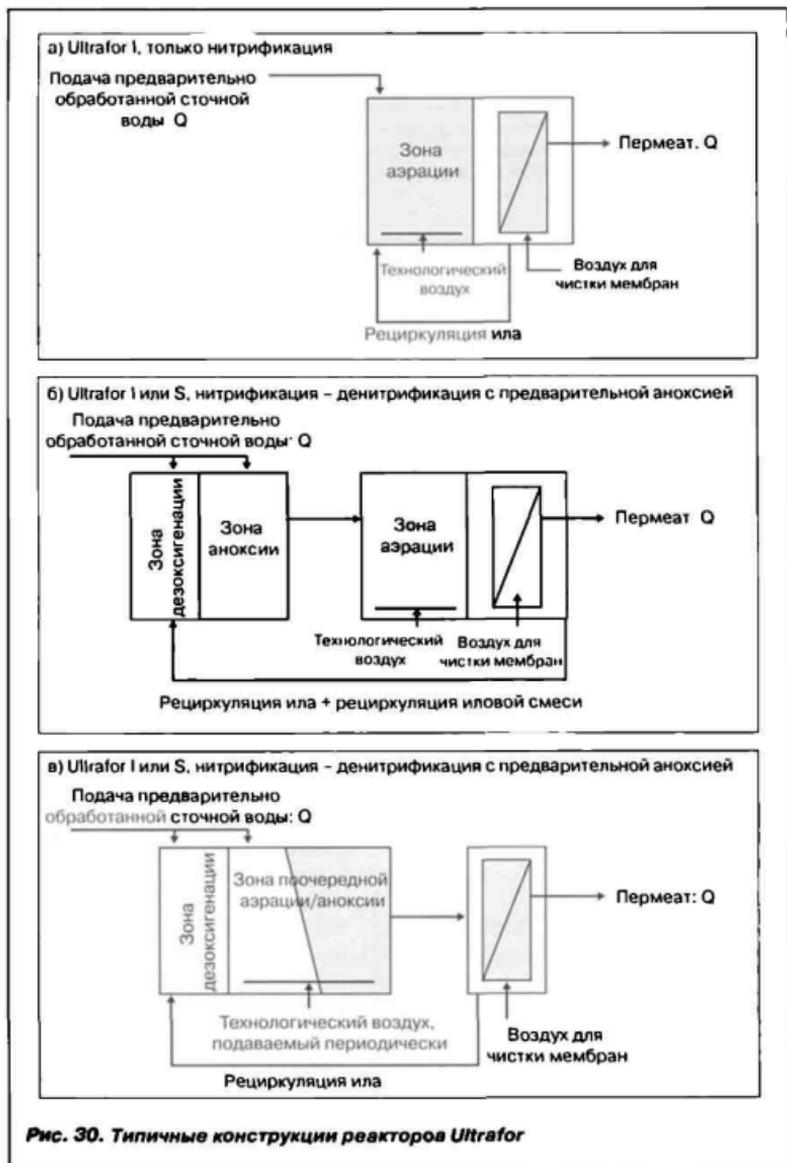
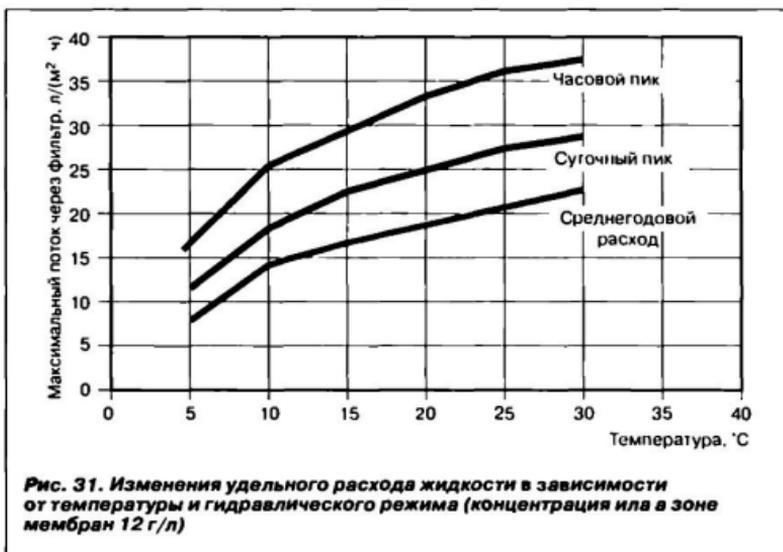


Рис. 30. Типичные конструкции реакторов Ultrafor

■ Площадь поверхности мембран

Учитывая влияние пиковых нагрузок на расчет мембран, для правильного определения общей площади фильтрации важно хорошо знать гидравлические режимы работы установки. В случае повышенного коэффициента пиковых нагрузок следует предусмотреть такие меры оптимизации, как буферный резервуар или отдельная установка для обработки дополнительных объемов сточных вод.



Необходимая площадь фильтрации корректируется в зависимости от температуры поступающих на обработку сточных вод и концентрации ила в жидкости, подлежащей фильтрации через мембраны. В зависимости от этих параметров удельный поток жидкости на мембраны обычно изменяется от 15 до 35 л/(м² · ч) (рис. 31).

1.6.4. Технические характеристики

Поскольку мембрана представляет собой физический барьер, вода, обработанная в реакторе **Ultrator**, имеет отличное качество по содержанию как ВВ и мутности, так и колиформных бактерий. Должный расчет параметров для обеспечения полной нитрификации позволяет также добиться низких показателей по ХПК, БПК и N-NH₄.

В табл. 5 приведены типичные результаты обработки ГСВ, полученные на установках **Ultrator**.

Очищенная вода столь высокого качества может быть непосредственно сброшена в чувствительную и очень чувствительную к загрязнению среду или даже направлена на повторное использование для различных целей.

Таблица 5

<i>Параметр</i>	<i>Концентрация</i>
ВВ, мг/л	< 2
Мутность, NTU	< 1
ХПК, мг/л	< 30
БПК, мг/л	< 3
N-NH ₄ , мг/л	< 1
Общий азот, мг/л	< 10
Фекальные колиформные бактерии, шт в 100 мл	< 100

Главные области применения и достоинства мембранных биореакторов рассматриваются в гл 15, п 4

1.7. Проблемы при эксплуатации

На сооружениях очистки сточных вод активным илом иногда возникают неисправности, снижающие надежность и эффективность их работы

Эти проблемы появились с самого начала применения активных илов, но их частота возросла в течение последних двадцати лет с внедрением систем, предназначенных для одновременного удаления азота и фосфора

Многие факторы способны ухудшить рабочие свойства активного ила. Одни из них связаны с качеством субстрата, т.е. с составом обрабатываемой сточной воды, другие — с конструкцией и режимом эксплуатации биологической системы (табл 6)

Из наиболее часто встречающихся проблем эксплуатации рассмотрим следующие: всплывание ила, вспенивание, всплывание ила при осветлении

Таблица 6

Факторы, влияющие на характеристики очистных сооружений с активным илом

<i>Состав сточных вод</i>	<i>Биореактор с активным илом</i>
Промышленные примеси	Конструкция реактора
Растворимая органическая фракция	Температура
Биогенные элементы (N и P)	Величина pH
Температура	Система аэрации
Величина pH	Перемешивание
Способность к загниванию	Наличие аноксидных или анаэробных зон
Общая соленость	Возраст ила
Концентрация масел и жиров	Концентрация активного ила в реакторе Концентрация растворенного кислорода в реакторе

1.7.1. Вспухание ила

Под вспуханием ила (англ. *bulking sludge*) подразумевается наличие в активном иле нитчатых бактерий, которые влияют на его способность к отстаиванию (индекс ила поднимается выше 200 мл/г) и потому ухудшают качество очищенной воды. Негативные явления, вызванные бактериальными нитями, пропорциональны плотности и в особенности длине последних. Они также зависят от имеющихся видов нитчатых бактерий: некоторые из них более опасны, чем другие.

На основании работ, проведенных рядом исследователей, в частности Эйкельбаумом (Eikelbaum) и Дженкинсом (Jenkins), создана классификация 29 типов нитчатых бактерий. В табл. 7 (см. также гл. 6, п. 3.3.1, табл. 8) приведены чаще всего наблюдаемые типы волокон и основные причины их развития.

Таблица 7

Типы нитчатых бактерий, встречающиеся в активном иле, и причины их появления

Причина развития	Определяемый тип нитчатых бактерий
Низкая концентрация кислорода	<i>S. natans</i> , <i>H. hydrossis</i> , тип 1701
Слабая массовая нагрузка в реакторе с однородной смесью	<i>M. parvicella</i> , <i>Nocardia</i> spp., <i>H. hydrossis</i> , типы 021N, 0041, 0675, 0092, 0581, 0961 и 0803
Загнивающие сточные воды, наличие соединений серы	<i>Veggiatoa</i> spp., <i>Thiothrix</i> spp., тип 021N
Недостаток биогенных элементов (азота и фосфора)	<i>Thiothrix</i> spp., типы 021N, 0041 и 0675
Низкая величина pH (менее 6,5), недостаток биогенных элементов	Грибы

Учитывая разнообразие нитчатых бактерий и условий, которые могут вызвать негативное явление, практические действия при обнаружении вспухания ила заключаются в следующем:

- оценка масштаба зарастания нитчатыми бактериями;
- определение (под микроскопом) видового состава бактерий;
- определение соответствующих мер борьбы
 - краткосрочных (оперативных): изменение скорости циркуляции ила, добавление вспомогательных средств для осаждения ила, хлорирование ила (более подробно способы проведения этих мероприятий описаны в гл. 6, п. 3.3.1);
 - долгосрочных (стратегических): проверка способности поступающих сточных вод к загниванию, внесение биогенных элементов, изменение массовой нагрузки, интенсивность аэрации и т. п.

Часто применяемым методом борьбы с явлением вспухания является **хлорирование активного ила**, цель которого состоит в уничтожении нитчатых бактерий на поверхности хлопьев ила без слишком сильного воздействия на флокулирующие бактерии. Для эффективной борьбы необходимо строго соблюдать условия применения: соответствующую дозировку в расчете на общую массу активного ила в системе (от 2 до 6 кг Cl_2 на 1 т ила в 1 сут), правильную частоту и точку ввода (отличное

перемешивание, концентрированный ил) с последующей частой проверкой качества очищенной воды

Также можно использовать другие окислители — озон или перекись водорода

1.7.2. Вспенивание

Вспенивание активного ила — явление, выражающееся в образовании коричневой пены на поверхности аэротенка («шоколадной пены»), стабильная и вязкая, она может выноситься на поверхность осветлителя и попадать в отводимую воду.

Вспенивание вызывают два основных нитчатых микроорганизма — *Nocardia spp* и *Microthrix parvicella*, которые можно определить под микроскопом. Эти медленно размножающиеся бактерии часто связаны с наличием в сточной воде масел и жиров, относительно высокой температурой (выше 18 °C) и со значительным возрастом активного ила (более 9 сут). Избирательное накопление *Nocardia spp* в всплывшей на поверхность пене приводит к увеличению времени их задерживания в аэротенке и благоприятствует их размножению даже в системах с меньшим возрастом ила.

Вспенивание, вызванное *Nocardia spp*, по-видимому, является следствием гидрофобных свойств клеточной мембраны и обуславливает всплытие бактерий на поверхность аэротенка.

Пену очень трудно устранить химическими средствами по причине ее устойчивости, хотя орошение ила хлорированной водой может представлять интерес как краткосрочная мера.

Самые действенные средства борьбы направлены на устранение причин, стимулирующих размножение *Nocardia spp.*, а именно

- устранение предпочтительных для нее субстратов, таких как жиры, жирные кислоты,
- проектирование аэротенков, в которых невозможно накопление плавающих веществ следует избегать погружных перегородок, которые удерживают пену, и предусматривать уловители-дегазаторы для удаления плавающих веществ,
- удаление пены из биологических реакторов во избежание ее циркуляции и постоянного возобновления в системе

1.7.3. Всплывание ила

Проблема, которая иногда встречается в осветлителях, — всплывание, или флоатация, хлопьев ила с хорошей отстаиваемостью. Наиболее частой причиной является денитрификация — биохимическая реакция, в результате которой нитраты и нитриты восстанавливаются до газообразного азота.

Начиная с некоторой критической концентрации пузырьков газа в гуще илового слоя, часть хлопьев всплывает на поверхность. Этот феномен отличается от всплывания наличием мелких пузырьков газа, прилипших к взвешенным частицам.

Часто такое явление наблюдается на очистных сооружениях с нитрифицирующим активным илом, где денитрификация недостаточна, а также на сооружениях, рассчитанных на окисление только углеродных соединений, когда повышение температуры стимулирует нитрификацию или когда биомасса ила проявляет высокую активность из-за своего малого возраста. Это объясняет факт, что всплывание ила часто происходит в жарких странах (с температурой выше 25 °C), где практически невозможно избежать нитрификации в обрабатываемых сточных водах.

Средства для решения проблемы всплывания ила следующие:

- увеличение расхода рециркуляции ила с целью уменьшить время его пребывания в осветлителе,
- ускорение отвода ила,
- уменьшение возраста ила во избежание нитрификации.

В жарких странах по указанным выше причинам настоятельно рекомендуется конструировать биологические реакторы так, чтобы можно было при необходимости проводить в них денитрификацию

Максимально возможная концентрация нитратов на входе в осветлитель, не вызывающая всплывания ила, зависит от температуры. В качестве ориентира можно указать величину 8–10 мг/л N-NO₃ при 20 °С

2. Способы с фиксированными культурами

2.1. Орошаемые биофильтры

2.1.1. Основные характеристики

Орошаемые биофильтры, также называемые иногда бактериальными фильтрами, уже почти 100 лет используются для биологической очистки ГСВ и ПСВ

Как указывалось в гл. 4, п. 2.2.2, орошаемые биофильтры являются биологическими реакторами с прикрепленными культурами микроорганизмов, развивающихся на поверхности не погруженного в воду контактного материала, либо традиционного (пущолан, галька), либо пластикового, через который непрерывно протекает подлежащая обработке вода

Орошаемые биофильтры с традиционными природными загрузками по причине недостатков, упомянутых в гл. 4, сегодня практически полностью уступили место биофильтрам с пластиковыми нагрузками или другим биологическим процессам

Орошаемые биофильтры с пластиковой нагрузкой бывают круглой, восьмиугольной или прямоугольной формы с высотой от 4 до 10 м. Чтобы избежать заиливания фильтра и способствовать циркуляции воздуха в нем, нагрузка поддерживается решетками или системой арматуры. Обработанная вода, прошедшая фильтрацию, направляется во вторичный отстойник для отделения образовавшегося осадка. Часть воды после фильтрации или отстойника возвращается на вход биофильтра для разбавления подлежащих обработке сточных вод и обеспечения достаточного «смачивания» биопленки на нагрузке.

2.1.2. Применение и характеристики

Учитывая чувствительность данного способа к заиливанию, обработку на орошаемых биофильтрах лучше проводить после первичного отстаивания или обработки на тонких ситах (с отверстиями менее 3 мм). Орошаемые биофильтры могут применяться для очистки от углеродных загрязнений, для удаления БПК и нитрификации, а также для третичной нитрификации на стадии доочистки

■ Удаление БПК

Показатели удельной площади поверхности различных пластиковых нагрузок широко варьируются. Поэтому расчет орошаемых биофильтров рекомендуется проводить с использованием **удельной поверхностной нагрузки** (кг БПК в 1 сут на 1 м² рабочей поверхности), а не **объемной нагрузки** (кг БПК в 1 сут на 1 м³ загрузки). Удельная поверхностная нагрузка позволяет также точнее оценить характеристики процесса очистки

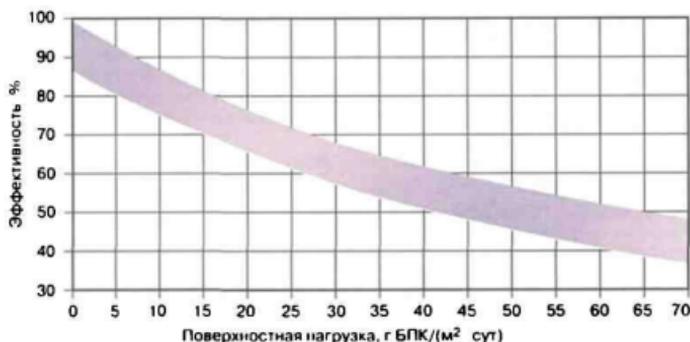


Рис. 32. Эффективность удаления БПК в зависимости от величины удельной поверхностной нагрузки (при 15 °C)

На рис. 32 показана оценка эффективности удаления БПК в зависимости от величины удельной поверхностной нагрузки. При обработке типичных ГСВ после их первичного отстаивания поверхностная нагрузка порядка 5 г БПК/(м² сут) позволяет получить на выходе менее 30 мг БПК/л.

■ Нитрификация

В принципе можно совместить удаление БПК и частичную нитрификацию на одной ступени обработки. Тем не менее по причине влияния величины нагрузки по БПК предпочтительнее использовать две, даже три последовательные ступени обработки с промежуточным отстаиванием (рис. 33). В этих условиях использование орошаемого биофильтра для третичной нитрификации позволяет достигать 80%-й эффективности извлечения аммонийного азота при поверхностной нагрузке порядка 1–1,5 г N-NH₄ в 1 сут на 1 м² развитой поверхности загрузки.

В заключение отметим, что при кажущейся простоте орошаемые биофильтры с точки зрения биологической кинетики и внутренней гидродинамики являются сложными системами. Расчет их параметров основывается только

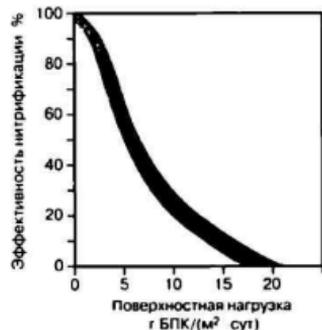


Рис. 33. Эффективность нитрификации в зависимости от величины удельной поверхностной нагрузки по БПК (при 15 °C)

на эмпирических формулах, полученных в пилотных исследованиях и на действующих сооружениях

2.2. Биологические фильтры

2.2.1. Общие сведения

Используемый в обработке сточных вод термин **биологические фильтры**, или **биофильтры**, обозначает группу способов, в которых объединены биологическая очистка фиксированными (прикрепленными) культурами микроорганизмов и извлечение ВВ

В технологии биофильтров применяются тонкие биологические пленки, регулярно обновляемые с помощью промывок (цикл от 12 до 48 ч) В результате создается биомасса с большей концентрацией, а главное, с большей активностью, чем у активного ила Основные преимущества биофильтров по сравнению с обработкой активным илом следующие

- **меньшая занимаемая площадь**, в частности, благодаря отсутствию стадии осветления Компактность дает возможность строить закрытые очистные сооружения, ограничивать распространение запаха и шума, придавать им эстетичный внешний вид.
- **нет риска вымывания**, поскольку биомасса закреплена на носителе, позволяющем ей противостоять изменениям расхода воды.
- **приспособленность к очистке разбавленных сточных вод** скорость потока обрабатываемой воды может быть повышена без вреда для процесса обработки (см далее).
- **модульная конструкция** и удобство для автоматизации (можно сравнить с батареями фильтров на станциях питьевой воды)

Аэрация может осуществляться путем предварительного насыщения обрабатываемой воды кислородом воздуха (биофильтр **Florac**) или прямым введением воздуха в реактор (биофильтр **Biofor**)

Способ с **предварительным насыщением** обрабатываемой воды кислородом был разработан для третичной фильтрации в целях снижения остаточной БПК и, кроме того, более полного удаления ВВ Этой технологии соответствует способ **Florac**, разработанный компанией «Дегремон» в 70-х гг Ограничения в его применении обусловлены максимально возможным количеством растворенного кислорода При атмосферном давлении на практике трудно добиться более 85 % насыщения воды кислородом, т. е. 6–9 мг O_2 /л в зависимости от температуры Можно удвоить эту цифру, рециркулируя 100 % обработанной воды, но это позволит извлечь в лучшем случае 15–20 мг/л БПК

Попытки преодолеть это ограничение привели к разработке в начале 80-х гг установок с **подачей кислорода внутрь реактора** В этом случае особую важность представляют соответствующие направления движения потоков воздуха и воды Практика фильтрации питьевой воды привела к первому из реализованных подходов — реакторам с нисходящим потоком воды и противотоком воздуха Такой способ создал некоторые проблемы

- **забивание поверхности взвешенными веществами**. Перемещение фронта фильтрации и отложение осадка в толще фильтра нарушаются восходящим потоком воздуха, что выражается в быстром росте потерь напора, снижении выхода очищенной воды и сокращении длительности циклов.

— закупорка газом. Противоток газа и жидкости приводит к слиянию пузырей воздуха. В толще загрузки образуются воздушные «карманы», создающие газовую закупорку.

— распространение неприятных запахов. Поступающие сточные воды находятся в верхней части фильтра, и выходящие пузыри воздуха увлекают за собой дурно пахнущие вещества.

Эти разнообразные проблемы вызвали отрицательное отношение к биофильтрации с нисходящим потоком воды и привели компанию «Дегремон» к выбору в 1982 г. технологии **смешанных (сопотоčných) восходящих потоков воды и воздуха** — способа **Biofor**. Обращаем внимание на одно исключение: при нитрификации питьевой воды принцип противотока воды и воздуха еще может использоваться, так как риск закупорки газом снижен из-за малого расхода воздуха (способ **Nitrazur** — см. гл. 4, п. 6).

2.2.2. Способ и установка Biofor

2.2.2.1. Общие характеристики

Установка **Biofor** — биологический реактор с культурами микроорганизмов, закрепленных на погруженном в воду слое специального материала. Этот материал на основе вспученной глины, называемый **Biolite**, с плотностью более $1,2 \text{ т/м}^3$ имеет большую удельную поверхность при сильной шероховатости. Такие свойства позволяют сохранять бактериальную пленку, достаточную для очень быстрой активизации биологического процесса, даже после энергичной гидродневматической промывки.

Реактор **Biofor** функционирует с **восходящим потоком воды и воздуха**, что предоставляет многие преимущества: достаточно большую скорость прохождения воды, повышенное задержание ВВ (за счет равномерного распределения ВВ во всем объеме фильтра), высокую эффективность аэрации.

Аэрация осуществляется путем **распределения воздуха, называемого технологическим**, в объеме фильтрующей загрузки. Равномерность распределения обеспечивается сетью коллекторов, на которых установлены мембранные диффузоры **Oxazur**.

Периодические промывки позволяют удалить ил, накопившийся в загрузке вследствие задержания ВВ и размножения бактерий. Промывки водой и воздухом автоматизированы и запускаются в действие либо при достижении максимальной потери напора, либо по окончании предустановленной максимальной длительности цикла. Грязная промывная вода собирается в резервуар, а затем подвергается обработке и используется вновь.

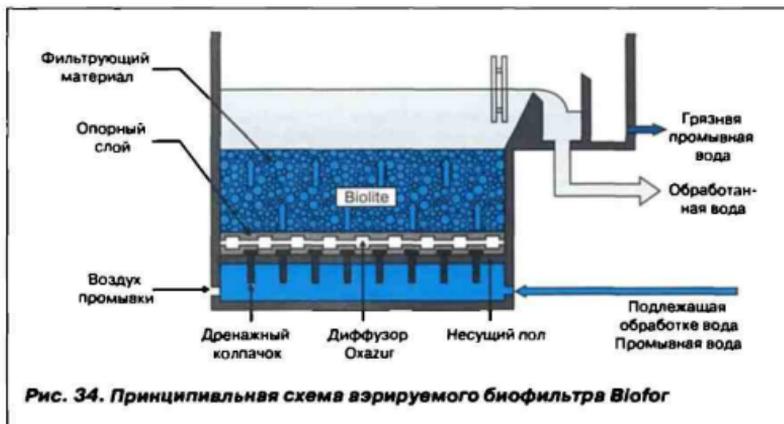
Реактор **Biofor**, разработанный в начале 80-х гг. для вторичной очистки ГСВ, постепенно преобразовался в несколько разновидностей, обеспечивающих решение различных задач. Их можно объединить в два семейства:

- аэрируемые реакторы **Biofor C** для удаления углерода, **Biofor CN** для удаления углерода с частичной нитрификацией, **Biofor N** для глубокой нитрификации;
- реакторы без аэрации: **Biofor pré-DN** или **Biofor post-DN** для соответственно предварительной или окончательной денитрификации.

2.2.2.2. Аэрируемые установки Biofor

■ Описание

Установка **Biofor** состоит из батареи одинаковых реакторов (биофильтров), построенных на единой бетонной прямоугольной основе, в каждом из которых имеется (рис. 34):



- колодец подачи исходной воды с защитным ситом;
- несущий пол, поддерживающий гранулированную загрузку и оснащенный дренажной колпачковой системой ввода и распределения жидкостей (воды и воздуха);
- два фронтальных водослива для отвода очищенной воды и промывных вод. Водосливы защищены вертикальной решеткой для успокоения турбулентности и облегчения всплывания пузырей воздуха, прилипших к гранулам загрузки **Biolite**;
- фронтальный сборный желоб, являющийся частью общего коллектора отвода воды от батареи биофильтров.

На несущем полу расположены два промежуточных опорных слоя и около 3–4 м загрузки из материала **Biolite**. Равномерное распределение жидкостей, поступающих под несущий пол фильтра (исходная сточная вода, промывная вода, воздух промывки), обеспечивается дренажными колпачками того же типа, что и в песчаных фильтрах, но приспособленными специально для сточных вод; частота их размещения — примерно 50 колпачков на 1 м² площади.

Ввод и распределение технологического воздуха осуществляется через опорный слой с помощью диффузоров с эластичной мембраной; частота их размещения — 25 или 50 штук на 1 м² площади.

Плотность и гранулометрический состав загрузки **Biolite** выбирают в зависимости от применения биофильтра. Для взвешиваемых реакторов **Biofor** в настоящее время используют два типа материала:

- **Biolite L 2,7** с эффективным размером гранул от 2,5 до 2,9 мм;
- **Biolite P 3,5** с эффективным размером гранул от 3,2 до 3,8 мм.

Для особых целей можно выбрать материал **Biolite** с другим гранулометрическим составом.

Кроме описанной батареи реакторов, действующих параллельно или (при необходимости) в параллельных сериях, установка **Biofor** содержит (рис. 35):

- сооружение для распределения подлежащей обработке воды;
- галерею доступа к автоматическим задвижкам, распределительным сетям, дну фильтров, сливным желобам и т. д.;
- помещение с насосами, используемыми для промывки;

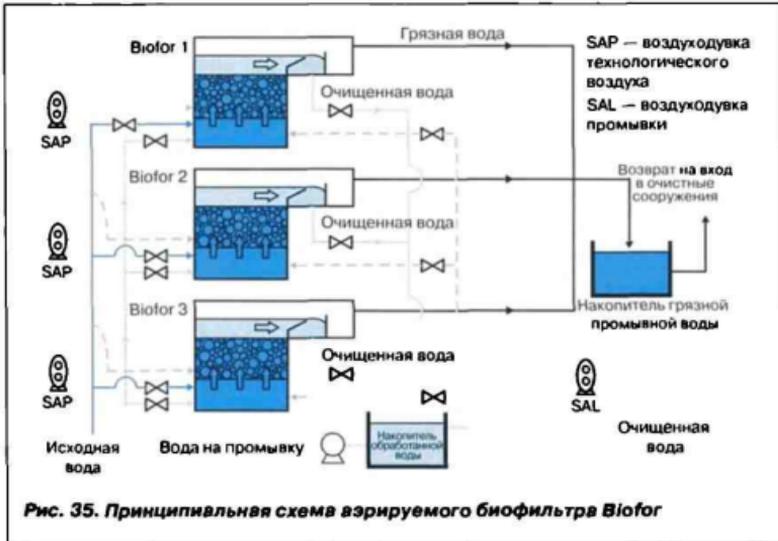


Рис. 35. Принципиальная схема взируемого биофильтра Biofor

- помещение для различных воздуходувок и компрессоров,
- резервуар очищенной воды, используемой для промывки (возможна также взаимная промывка между биофильтрами);
- резервуар для сбора загрязненных промывочных вод с насосом перекачивания.

■ Работа установки, автоматизация

Сточные воды, пропущенные через сито, подаются в пространство под несущим полом реактора. Число действующих биофильтров устанавливается либо с учетом расхода поступающего потока сточных вод, либо в зависимости от нагрузки по загрязняющим веществам, приходящейся на всю батарею реакторов.

Технологический воздух подается на действующие реакторы постоянно. Его поток обеспечивается или собственной воздуходувкой каждого реактора, или (особенно на крупных сооружениях) центральной воздуходувной станцией с управляющими вентилями на входе в каждый биофильтр.

Обработанная вода, вытекающая через фронтальный слив, после заполнения резервуара для промывки направляется самотеком на выпуск либо подается на вторую ступень биологической обработки.

Процедуры цикла промывки автоматизированы и продолжаются около 50 мин. Цикл состоит из нескольких фаз: промывка воздухом и водой, промежуточная промывка только водой, а затем окончательное ополаскивание водой. Потребность в очищенной воде для промывки составляет около 10 м^3 на 1 м^2 фильтра. Промывочная вода обычно составляет 5–8 % от объема воды, обработанной на данной ступени очистки.

Управление циклами промывки, включение всех двигателей и автоматических задвижек обеспечиваются программируемым автоматом (см. гл. 21, п. 2.1.2).

■ Применение и технические характеристики

Обработка воды в реакторах **Biofor** обычно проводится после ее первичного отстаивания, предварительной физико-химической или биологической обработки. Максимальное содержание загрязнений в ГСВ, допустимое для их обработки на установках **Biofor**, приведено в табл. 8

Таблица 8
Максимальные концентрации на входе в реактор Biofor

Показатель	ВВ	БПК	ХПК	NK	N-NH ₄
Максимальная концентрация, мг/л	250	300	800	90	75

Установки **Biofor** в основном применяются в следующих случаях:

— на сооружениях, когда компактность установки **Biofor** дает значительные преимущества (она занимает в 3–5 раз меньше площади, чем обычные сооружения с активным илом),

— на сооружениях с резкими гидравлическими перегрузками (например, в период дождей). Закрепленная на загрузке биомасса не вымывается, и технические характеристики работы установки, включая возможность процесса нитрификации, восстанавливаются после первой же промывки.

В табл. 9 и 10 приведены скорости и нагрузки, допустимые для различных взвешиваемых типов установки **Biofor**, а также средние значения технических характеристик. Эти величины могут изменяться в зависимости от определенных условий: температуры, возможности биоразложения загрязнений и характеристик подлежащей об-

Таблица 9
Допустимые скорости и нагрузки для взвешиваемых реакторов Biofor (при температуре 15–20 °С)

Тип реактора Biofor	Назначение	Параметры		Величина
Biofor C	Удаление углерода (БПК)	Скорость воды	м ³ /(м ² · ч)	3–16
		Нагрузка по БПК	кг БПК/(м ³ · сут)	3–6
Biofor CN	Удаление углерода и частичная нитрификация	Скорость воды	м ³ /(м ² · ч)	3–12
		Нагрузка по БПК	кг БПК/(м ³ · сут)	1,2–2,0
		Нагрузка по нитрификации	кг N-NH ₄ /(м ³ · сут)	0,4–0,6
Biofor N	Третичная нитрификация	Скорость воды	м ³ /(м ² · ч)	3–12 3–20 ¹
		Нагрузка по нитрификации	кг N-NH ₄ /(м ³ · сут)	1,2–1,6

¹ Без задачи по задержанию ВВ

Таблица 10

Типичные показатели эффективности аэрируемых реакторов Biofor

Показатель	Тип реактора		
	Biofor C	Biofor CN	Biofor N
	после первичного отстаивания		после биологической обработки
Тип материала Biolite	P 3,5	L 2,7	L 2,7
ВВ, %	60–80	65–85	40–75
БПК, %	65–85	70–90	40–75
ХПК, %	55–75	60–80	30–60
Нитрификация, %	–	< 75	80–95

работке воды, в частности от соотношения в ней растворенных и взвешенных загрязнений.

■ Снижение БПК

На рис. 36 более наглядно показаны объемные нагрузки по БПК, которые можно допустить на установке Biofor в зависимости от цели обработки и величины БПК в исходной воде.

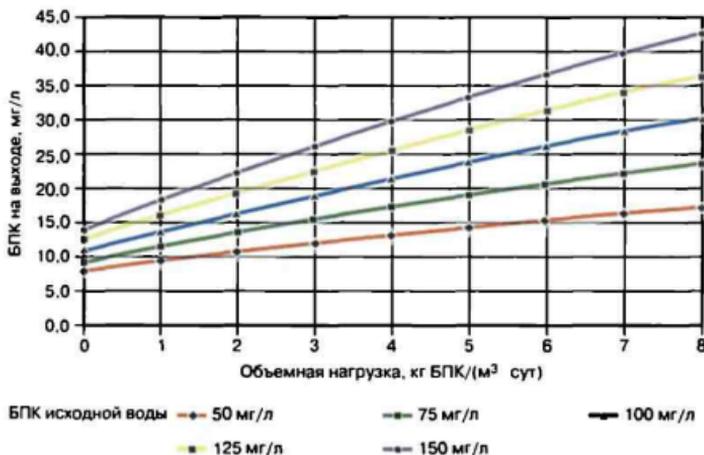


Рис. 36. Влияние объемной нагрузки по БПК на величину БПК в обработанной воде (при 15 °С)

При обработке ГСВ средней концентрации после первичного отстаивания и при нагрузке 2–4 кг БПК/(м³ · сут) можно надежно получать БПК на выходе ниже 25 мг/л. На разбавленной воде (БПК менее 70 мг/л) удастся даже поднять величину нагрузки до 6 кг БПК/(м³ · сут)

Величина допустимой нагрузки зависит от температуры, а гранулометрический состав материала загрузки мало сказывается на удалении БПК.

■ Нитрификация

Максимальная нагрузка по нитрификации [кг N-NH₄/(м³ · сут)], как и весь процесс нитрификации, существенно зависит от температуры, а также от соотношения концентраций легко ассимилируемого углерода и N-NH₄, т. е. от проведенной первичной обработки воды. Именно это следует из табл. 9 и видно на рис. 37. Данные в табл. 9 показывают, что нагрузка по БПК около 1,5 кг/(м³ · сут) приводит к снижению допустимой нагрузки по нитрификации приблизительно в 3 раза, а кривые на рис. 37 тоже наглядно демонстрируют влияние растворимой БПК на процесс нитрификации (снижение эффективности физико-химической обработки при средней нагрузке).

Когда требуется **частичная нитрификация** (эффективность по параметру НК ниже 70 %), достаточно лишь одной ступени биофильтрации на установке **Biofor CN**. При этом рекомендуется удалять максимальное количество углерода на стадии первичной физико-химической обработки.

Когда необходима **полная нитрификация** (эффективность по параметру НК 80–96 %), выгодно удалять максимальное количество углерода на первой ступени обработки. В таком случае реактору **Biofor N** должен предшествовать реактор **Biofor C** или, при средней нагрузке, азротенк с активным илом. При этом возможна нитрификация порядка 1,6 кг N-NH₄/(м³ · сут) при температуре 20 °С.

Для **промежуточной эффективности денитрификации** (65–85 %) рекомендуется сравнить вариант с одноступенчатой обработкой в реакторе **Biofor CN** с вари-

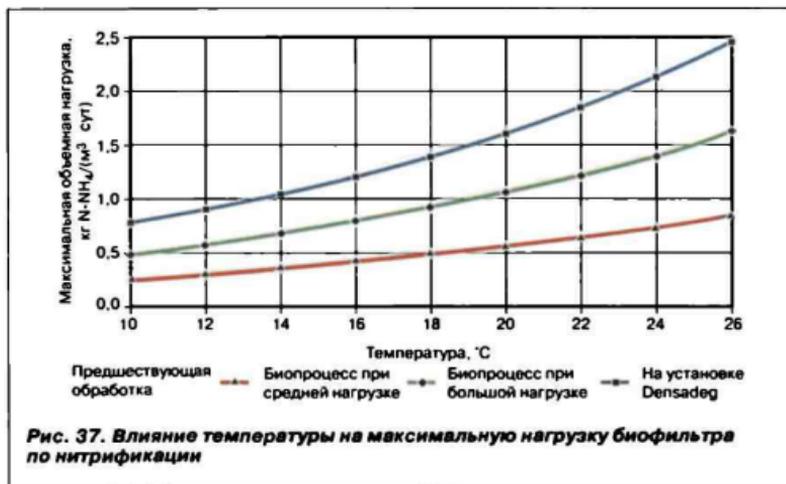


Рис. 37. Влияние температуры на максимальную нагрузку биофильтра по нитрификации

антом двухступенчатой обработки (сначала в реакторе **Biofor C**, а затем в реакторе **Biofor N**) и лишь после этого сделать выбор

■ Удаление ВВ

Технические параметры реактора **Biofor** зависят от выбранного материала загрузки, от концентрации ВВ в поступающей воде и от гидравлической нагрузки на фильтр. Для подлежащей обработке воды с содержанием ВВ менее 100 мг/л эффективность их удаления изменяется от 75 до 85 % при средней скорости воды 3–6 м/ч

■ Производство избыточного ила

Образование избыточной биомассы является следствием извлечения ВВ и роста гетеротрофной и автотрофной биомассы. Оно характерно для биологических систем со средней нагрузкой, рассчитанных на эффективное задержание ВВ. Емкость фильтра по ВВ между двумя промывками обычно составляет 2,5–4,0 кг ВВ на 1 м³ материала загрузки

Задержанные ВВ извлекаются вместе с промывной водой, где их содержание колеблется от 200 до 1500 мг/л в зависимости от процесса обработки в установке **Biofor**. Промывную воду либо возвращают на сооружения первичной обработки, либо подвергают отдельной обработке отстаиванием или флотацией. Заметим, что этот излишний ил обладает гораздо лучшими характеристиками для отстаивания и обезвоживания, чем обычный активный ил

■ Скорость подачи технологического воздуха

Скорость подачи технологического воздуха, $\text{Нм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, должна быть достаточной для покрытия потребности обрабатываемой воды в кислороде для окисления углерода, для окисления аммонийного азота и для эндогенного дыхания ила. В зависимости от местных условий она может изменяться от 5 до 25 $\text{Нм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ и даже более на стадии третичной нитрификации при повышенной температуре. При эффективности обогащения кислородом в реальных условиях от 15 до 25 % энергозатраты на аэрацию составляют 0,5–0,7 кВт · ч на 1 кг удаленной БПК (при полной нагрузке), или 2,5–3,1 кВт · ч на 1 кг нитрифицированного N-NH_4 . К этим энергозатратам прибавляется энергия, расходуемая на периодические промывки материала загрузки порядка 0,1 кВт · ч на 1 кг удаленной БПК и 0,15 кВт · ч на 1 кг нитрифицированного N-NH_4 в реакторе **Biofor N**.

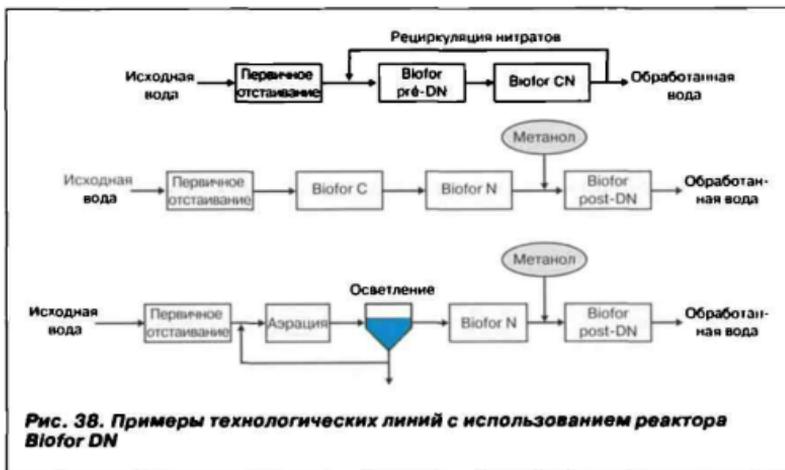
2.2.2.3. Реакторы **Biofor DN** без аэрации (денитрификация)

■ Описание

Реактор **Biofor без аэрации**, или **Biofor DN**, позволяет проводить биохимическое восстановление нитратов до молекулярного азота с участием денитрифицирующих бактерий, закрепленных на загрузке

Конструкция реактора **Biofor DN** подобна конструкции аэрируемых реакторов типа **Biofor**. Однако имеются следующие различия

- отсутствует сеть распределения технологического воздуха,
 - другой гранулометрический состав материала загрузки; используется в основном материал **Bioilite P 4,5** с эффективным размером гранул 4,2–5,0 мм без опорного слоя. В некоторых случаях также можно использовать **Bioilite P 3,5**.
- В зависимости от места размещения в технологической линии обработки различаются два типа реакторов **Biofor DN** (рис. 38), которые можно сочетать с другими



реакторами типа **Biofor** или с установками, использующими активный ил **Biofor pré-DN** и **Biofor post-DN**. Наличие легко усваиваемого органического ассимилируемого углерода, необходимого для денитрификации, обеспечивается либо (в первом случае) за счет быстро биоразлагаемой части БПК исходной воды после первичного отстаивания, либо (во втором случае) за счет внешнего источника углерода, обычно метанола.

■ Применение и технические характеристики

Критерии применения и расчета параметров двух типов реакторов **Biofor DN** существенно различаются (табл. 11)

Реактор **Biofor pré-DN**

Реактор **Biofor pré-DN** применяется после первичного отстаивания, с добавлением или без добавления химических реагентов, в сочетании с установленным за ним

Таблица 11
Допустимые скорости и нагрузки для реакторов **Biofor DN**
(при температуре 15–20 °C)

Тип реактора	Назначение	Параметр		Величина
Biofor pré-DN	Предварительная денитрификация	Скорость воды	$\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	10–30
		Нагрузка по денитрификации	$\text{кг N-NO}_2/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$	1,0–1,2
Biofor post-DN	Конечная денитрификация (с добавлением метанола)	Скорость воды	$\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	10–35
		Нагрузка по денитрификации	$\text{кг N-NO}_2/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$	3,5–5,0

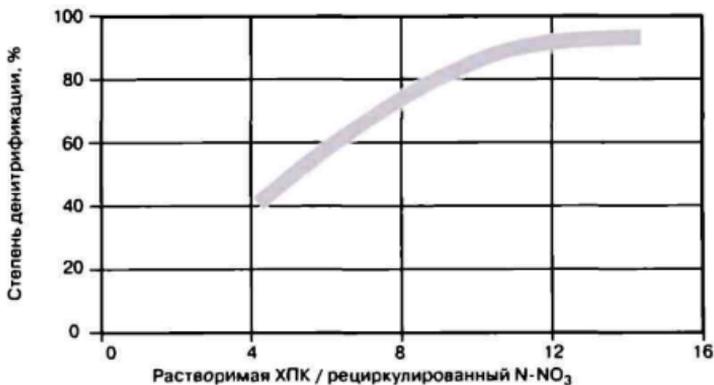


Рис. 39. Степень денитрификации в зависимости от отношения растворимой части ХПК к рециркулированной части N-NO₃

реактором **Biofor N** Нитраты, образованные при окислении аммонийного азота в реакторе **Biofor N**, частично возвращаются обратно на вход в **Biofor pre-DN** и денитрифицируются благодаря органическому углероду в отстоянной воде

Эффективность денитрификации находится в прямой зависимости

- от содержания быстро биоразлагаемой фракции ХПК в исходной сточной воде, другими словами, от отношения растворимой части ХПК к рециркулированной части N-NO₃. Именно это показано на рис. 39. Заметим, что задействована также коллоидная часть ХПК, чем частично и объясняется разброс данных, наблюдаемый на графике;

- от степени рециркуляции нитратов, которая может варьироваться от 100 до 400 % от входящего потока

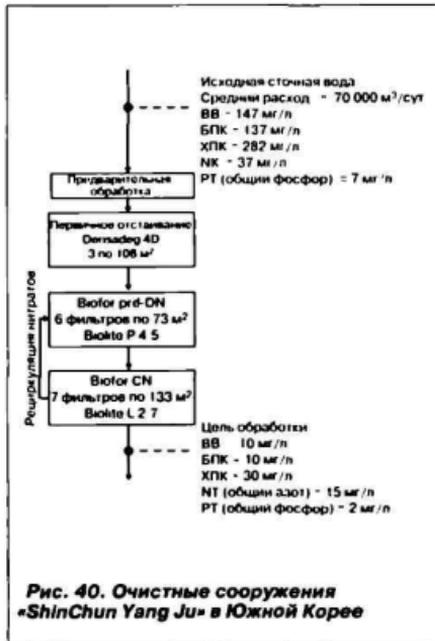
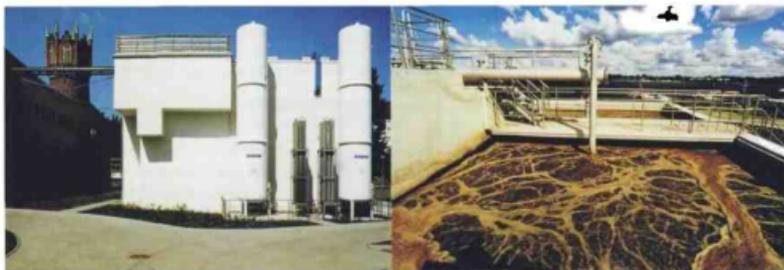


Рис. 40. Очистные сооружения «ShinChun Yang Ju» в Южной Корее



**Фото 13. Реактор Biofor post-DN, Росток (Германия).
Производительность 120 000 м³/сут**

Для типичных ГСВ с отношением ХПК к НК примерно 10–13 упомянутая выше последовательность обработки вполне пригодна, если требуемая эффективность удаления общего азота находится в пределах 65–70 %. Можно предусматривать и большую эффективность, около 70–80 %, но при этом возникает необходимость в дополнительных внешних источниках углерода и в повышенной степени рециркуляции, что неблагоприятно сказывается на габаритных характеристиках установки, несмотря на значительные скорости воды, допускаемые в реакторе Biofor pré-DN (см. табл. 11) Для эффективности свыше 80 % рекомендуется дополнительная ступень обработки в реакторе Biofor post-DN

Кроме того, при расчете параметров должен учитываться растворенный кислород, присутствующий в рециркулируемом потоке, который будет конкурировать с нитратами (понятие так называемого нитратного эквивалента $[\text{NO}_3^-] + 0,35[\text{O}_2]$)

Реактор **Biofor pré-DN** выгоден по многим причинам — он позволяет утилизировать органический углерод исходной сточной воды, а также снизить количество кислорода, необходимого для удаления БПК, и восстановить щелочность воды

Пример реализации такой технологической линии показан на рис. 40

Реактор Biofor post-DN

Реактор **Biofor post-DN** размещается в технологической линии обязательно после стадии нитрификации, реализуемой в реакторе **Biofor N** или в установке с активным илом при низкой нагрузке. Учитывая, что после нитрификации в воде уже нет легко биоразлагаемого органического углерода, необходимо **введение дополнительного углерода** (метанола или его аналога). Этот реагент смешивается с подлежащей нитрификации водой, которая поступает в пространство под несущий пол реактора. Дозирование реагента обязательно должно увязываться с величиной расхода обрабатываемой воды и эквивалентной концентрацией нитратов, чтобы избежать избытка метанола и не ухудшать показатели ХПК и БПК на выходе.

Реактор **Biofor post-DN** имеет следующие особые достоинства:

- очень высокая допустимая гидравлическая нагрузка (см табл. 11),
- очень высокая допустимая нагрузка по денитрификации, превосходящая $5 \text{ кг N-NO}_3/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$ при температуре выше 20°C (рис. 41),
- высокая эффективность денитрификации, достигающая 95 %

Главным недостатком является необходимость добавлять углеродный субстрат, из-за чего при неблагоприятных условиях повышаются эксплуатационные расходы.

2.3. Смешанные культуры: способ и реакторы Météor

2.3.1. Общие сведения

Способ **Météor** входит в группу технологий, называемых технологиями со смешанными культурами (см. гл. 4, п. 2.2.4.1). Способ реализуется в биологическом реакторе для удаления углерода и/или нитрификации, в котором бактерии закреплены на подвижном носителе. Носитель представляет собой пластиковые колечки с удельным весом, несколько меньшим, чем у воды, специально предназначенные для длительного и устойчивого заселения бактериями.

Реактор **Météor** постоянно азрируется сжатым воздухом, роль которого заключается, с одной стороны, в доставке необходимого для бактерий кислорода, а с другой — в поддержании взвешенного состояния материала-носителя.

Обрабатываемая вода и ил, покидающие реактор, направляются либо на вторую ступень обработ-



Рис. 42. Принцип действия реактора Météor



а) Meteor C



б) Meteor N

Фото 14. Типы носителей, используемых в реакторе Météor

ки, либо в отстойник. Часть отстаивающего ила возвращается на вход в реактор **Météor**. Носитель задерживается в реакторе при помощи неподвижной решетки с соответствующим по размеру прозором между прутьями (рис. 42)

Имеются два типа реактора с разным материалом-носителем (фото 14):

— **Météor C**, предназначенный для очистки от углеродного загрязнения,

— **Météor N**, применяемый в основном для нитрификации.

Во всех случаях использования реактора **Météor** настоятельно рекомендуется тщательная предварительная обработка воды: процеживание через тонкие решетки или сита после первичного отстаивания.

2.3.2. Реактор Météor C

Носитель в реакторе **Météor C** (см. фото 14, а) представляет собой полиэтиленовые элементы диаметром 45 мм и длиной 35 мм, имеющие удельную поверхность примерно $310 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Прозор между прутьями задерживающей решетки — 25 мм.

Météor C — способ биологической обработки с высокой нагрузкой (до $30 \text{ кг ХПК}/(\text{м}^3 \text{ сут})$), предназначенный главным образом для обработки ПСВ. Максимальная степень заполнения материалом составляет 40 % от объема реактора.

В зависимости от требуемой степени очистки реактор может использоваться:

— для предварительной обработки перед очисткой активным илом (такая схема с успехом используется для расширения очистных сооружений или при их реконструкции),

— для последовательной двухступенчатой обработки с последующим отстаиванием ила, для некоторых видов ПСВ, с флотацией.

Для эти схемы показаны на рис. 43.

2.3.3. Météor N

В реакторе **Météor N** материал-носитель состоит из полиэтиленовых колец меньшего размера, чем носитель в реакторе **Météor C** (см. фото 14, б): диаметр — 10 мм, длина — 7 мм. Удельная поверхность увеличена приблизительно до $870 \text{ м}^2/\text{м}^3$. Прозор между прутьями задерживающей решетки уменьшен до 5 мм.

Реактор **Météor N** применяется по двум различным схемам:

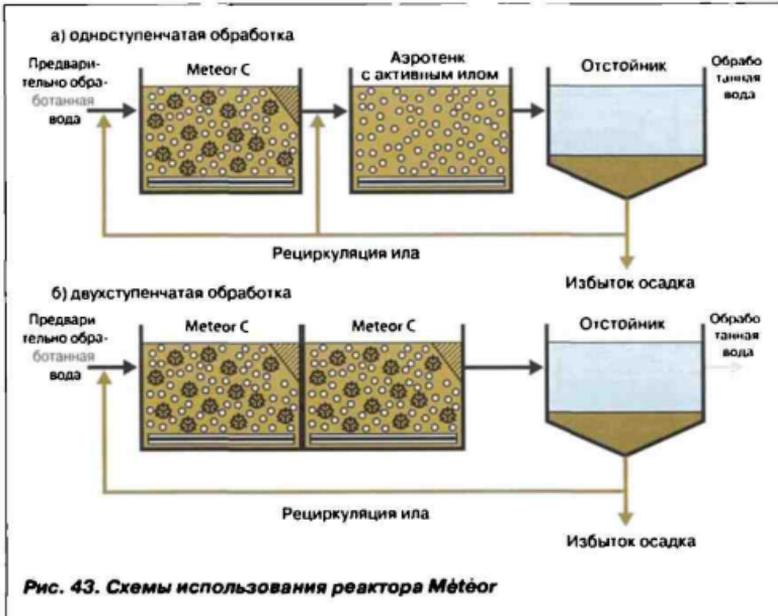
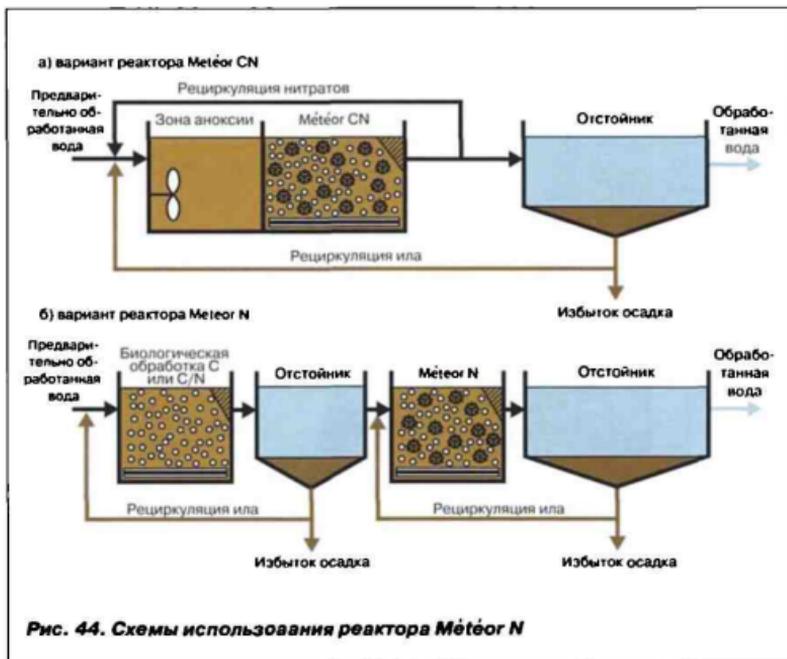


Рис. 43. Схемы использования реактора Метёр

— нитрификация предварительно обработанной воды в реакторе Метёр (так называемая версия Метёр CN) после денитрификации в аноксидной зоне и с рециркуляцией иловой смеси из отстойника на вход в линию обработки. Работа такой технологической линии подобна обычной обработке активным илом, рассчитанной для полного удаления азота, но с одним существенным отличием: поскольку нитрифицирующие бактерии иммобилизованы на материале-носителе, минимальный возраст ила больше не является расчетным параметром. Эта особенность позволяет значительно (приблизительно в 3 раза) уменьшить необходимый объем аэрируемого реактора. Кроме того, задействование ила с меньшим возрастом позволяет усилить роль более активной популяции бактерий-гетеротрофов и тем самым ускорить динамику денитрификации. Таким образом, реактор Метёр CN особенно подходит для следующих случаев

- **реконструкция очистных сооружений без значительной их модификации** — разделение существующего аэротенка на две различные зоны (аноксии и реактора Метёр CN), усиление системы аэрации, установка насосов рециркуляции иловой смеси и задерживающих решеток, это позволит обеспечить необходимое удаление общего азота на сооружениях, первоначально предназначенных только для удаления углерода;
- **малые очистные сооружения в зонах с холодным климатом** или подверженных сезонным изменениям поступления загрязнений: наличие иммобилизованных бактерий обеспечивает быстрое возобновление работы сооружений после остановки и поддерживает нитрифицирующую активность бактерий даже при низких температурах,



— **третичная нитрификация** (на стадии доочистки) предварительно обработанных сточных вод, за которой следует ступень сепарации (вариант реактора **Météor N**) Главной целью в этом случае является удаление аммонийного азота или достижение необходимого содержания НК на выходе Реактор **Météor N** также используется для нитрификации сточных вод с высокой концентрацией $N-NH_4$, например таких, как потоки, образующиеся при метановом сбраживании осадков и возвращаемые на очистные сооружения

Две эти схемы показаны на рис. 44.

2.3.4. Достоинства и недостатки

Главными достоинствами способа **Météor** являются:

- быстрое и эффективное устранение углеродных загрязнений (при нагрузке до $30 \text{ кг ХПК}/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$) или аммонийного азота (при нагрузке до $0,6 \text{ кг } N-NH_4/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$);
- существенный выигрыш в объеме реактора;
- стабильная и надежная обработка сточных вод;
- отличное решение для реконструкции или расширения очистных сооружений.

Из недостатков можно указать следующие:

- сложность полного удаления общего азота на некоторых видах сточных вод (при низком соотношении БПК/НК, при повышенном содержании НК),
- получение нестабилизированного избыточного биологического ила (осадка), характерного для очистных сооружений со средней нагрузкой.

3. Стандартные компактные установки

3.1. Способ и установка Bio-S

Bio-S — способ и установка очистки сточных вод с использованием **активного ила** при **низкой нагрузке**, в едином реакторе, действующем по **принципу реакторов последовательного действия**. Он предназначен и рассчитан для малых населенных пунктов (от 200 до 2000 ЭЖ). Установка может быть изготовлена из стали или бетона.

3.1.1. Принцип действия

Установка **Bio-S** (рис. 45) состоит из биологического реактора с переменным уровнем сточных вод, который соединен с резервуаром-накопителем, предназначенным для периодической подачи сточных вод в реактор.

Реактор работает в циклическом режиме. Типичный цикл включает обычные для реакторов такого принципа действия последовательные фазы:

- заполнение с аэрацией для окисления углеродных загрязнений и нитрификации и/или заполнения без аэрации для денитрификации,
- осветление и отстаивание ила,
- слив очищенной воды;

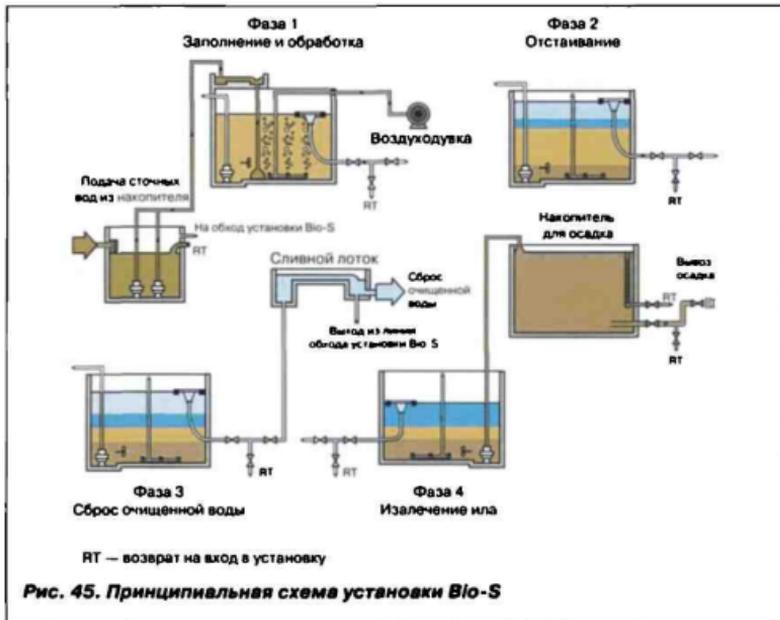


Рис. 45. Принципиальная схема установки Bio-S

— удаление избыточного биологического ила (осадка)

Количество циклов в сутки и длительность фаз программируются в соответствии с изменениями расхода и характеристик сточной воды. Предусмотрена работа установки **Bio-S** в цикле 24 ч, или в двух циклах по 12 ч для обработки концентрированных сточных вод, или в двух циклах по 12 ч, или в четырех циклах по 6 ч для более разбавленных сточных вод (какими обычно являются ГСВ)

3.1.2. Описание установки

Установка **Bio-S** (фото 15) включает

- **резервуар-накопитель**, выполняющий три функции: перекачивание очищенной сточной воды, сглаживание пиковых гидравлических нагрузок, накопление сточных вод во время фаз осветления и слива очищенной воды,
- **один биологический реактор** с системой аэрации барботажем воздуха, перемешиванием с помощью погружной мешалки, автоматизированным плавучим сливным устройством и системой отвода избыточного осадка,
- **накопитель для хранения избыточного осадка** с вертикальной дренажной решеткой,
- блок управления установкой, оборудованный **программируемым автоматом и устройством дистанционного наблюдения**



Фото 15. Макет установки **Bio-S**

3.1.3. Применение и преимущества

Область применения способа **Bio-S**, в основном типичные бытовые сточные воды и ПСВ предприятий аграрно-пищевой промышленности (в частности, молочных и сырных заводов)

Достоинства установки **Bio-S** те же, что и у биореакторов последовательного действия

- простота функционирования,
- отсутствие погружного подвижного оборудования (в частности, нет мостового скребка),
- превосходное отстаивание ила,



Фото 16



Фото 17

- полная автоматизация с дистанционным наблюдением,
- удобство размещения на площадке

На фото 16 и 17 демонстрируется компактность сооружения (единый корпус) и удобство его размещения на площадке

3.2. Способ и установка S&P

Установка **S&P** — компактное сооружение для обработки бытовых сточных вод с изменяемой производительностью от 50 до 3000 ЭЖ, основанное на системе биологических дисков

Принцип действия установки **S&P** основан на технологии полной обработки сточных вод, поэтому она предусматривает в стандартном варианте следующее



Фото 18. Собранный элемент установки для размещения в контейнере

- механическая предварительная обработка процеживанием, удалением песка и жира, а также первичным отстаиванием в мультисекционной камере,
- **ограничение и регулирование расхода** сточных вод с использованием либо черпакового колеса, либо распределителя потока (на несколько параллельных блоков).
- **биологическая обработка на дисках**, предназначенная для удаления углеродных загрязнений. Диски из полипропилена смонтированы на горизонтальном валу, вся конструкция размещается в емкости из полипропилена или бетона. Вал напрямую соединен с редуктором двигателя;
- **тонкослойный отстойник** для отделения осадка от обработанной воды. Так как от дисков отделяется только поступающий на отстойник избыточный ил, использование такой технологии позволяет уменьшить занимаемую площадь больше чем на 75 %. Осадки извлекаются периодическим откачиванием,
- в зависимости от требуемых норм очистки сточных вод установка может быть дополнена следующими видами обработки



Фото 19. Собранный элемент установки для размещения в контейнере

- нитрификация (вторая ступень дисков).
- химическая дефосфатация (синхронное дозирование FeCl_3);
- третичная очистка фильтрацией и обеззараживание (гипохлоритом натрия или кальция)

Предусмотрены три варианта размещения установки, в здании, на заглубленном или в контейнере (см. фото 18 и 19)

Технология S&P пригодна для обработки сточных вод гостиниц, центров отдыха, отдельных коттеджей и малых населенных пунктов и имеет следующие преимущества

- удобство эксплуатации и обслуживания,
- приспособленность к переменным расходам сточных вод и нагрузке по органическим загрязнениям,
- быстрота проектирования и монтажа на месте размещения
- отсутствие внешних раздражителей (шума и запаха) при работе

3.3. Способ Rhizopur

Rhizopur — это новый запатентованный компанией «Дегремон» способ обработки бытовых сточных вод, предназначенный для мелких населенных пунктов. В нем сочетаются орошаемый биофильтр и площадки инфильтрации, засаженные тростником, которые называют **ризофильтрами** (от фр. *rhizofiltres*). Взятые по отдельности, оба элемента хорошо известны. Оригинальность способа **Rhizopur** состоит как раз в их объединении

На рис. 46 представлена общая технологическая линия обработки сточных вод и осадка по способу **Rhizopur**

После предварительной обработки исходная сточная вода поступает на насосную установку, которая подает воду на верх **орошаемого биофильтра** 4-метровой высоты с **пластиковой загрузкой**. Эта первая ступень обеспечивает обработку растворимых и коллоидных углеродных соединений и, возможно, нитрификацию

Смесь биомассы с обработанной водой подается насосным агрегатом на ступень обработки на ризофильтрах. Число используемых ризофильтров равно иликратно

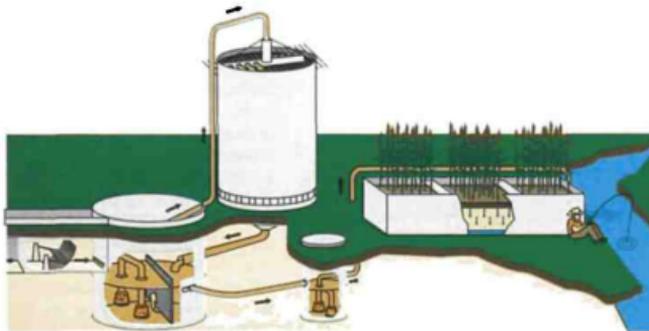


Рис. 46. Схема способа Rhizopur

грем, чтобы можно было чередовать периоды фильтрации и перерыва в их работе. Период созревания ризофильтра должен быть в два раза больше периода подачи на него упомянутой смеси.

Фильтрующая масса состоит из трех слоев с величиной гранул, возрастающей от поверхности ко дну: в верхнем слое — песок, в нижних слоях — гравий.

В песок высаживаются растения тростника (*Phragmites australis*), устойчивые к таким условиям грунта. Их главная роль заключается в стабилизации проницаемости фильтрующей загрузки за счет механического действия корневищ (ризом), которые также служат носителем для прикрепления на них бактерий.

Решение проблемы осадков существенно упрощено. Осадок поступает вместе с жидкостью на поверхность ризофильтров и подвергается медленному азробному сбраживанию. Накопленный слой осадка достигает 25 см за год при полной загрузке установки. Извлечение сброженного осадка должно производиться, когда толщина слоя достигнет 1–1,5 м, и выполняется механическими средствами. Дальнейшее назначение осадка выбирается в зависимости от местных условий.

Правильно спроектированная и рассчитанная технологическая линия по способу **Rhizopur** обеспечивает соблюдение требований по сбросу очищенных сточных вод для обычных зон: ХПК < 125 мг/л, БПК < 25 мг/л, содержание ВВ < 35 мг/л. Степень нитрификации аммонийного азота зависит от местных условий (температуры, фактической нагрузки и т. д.)

По своим техническим характеристикам (малая потребность в обслуживании, малое энергопотребление, медленное и стабильное производство осадка) способ **Rhizopur** особенно подходит для небольших сооружений. В настоящее время в эксплуатации находятся три десятка станций производительностью от 100 до 1000 ЭЖ.

4. Снижение производства осадка

Понятие **снижение производства осадка** применяется к технологиям, позволяющим снизить массу ила непосредственно в источнике их образования. Включенные в линию обработки сточных вод, эти технологии реализуются совместно с процессами обработки сточных вод активным илом: рециркулирующий ил до своего возвращения в биореактор полностью или частично подвергается химическому или ферментативному воздействию, а затем разлагается и минерализуется в реакторе (рис. 47).

Снижение производства осадка основано на двух механизмах.

— **гидролиз органических веществ** — плотная часть ила переводится в частично растворенное состояние, превращаясь в легко биоразлагаемые соединения;

— **воздействие химического или биологического стресса** — микроорганизмы вынуждены направить большую часть своей энергии на обеспечение физиологических функций выживания в ущерб размножению.

Используемые вместе или по отдельности, эти два явления приводят к значительному уменьшению массы производимого осадка (до 80 и даже до 95 % в очень благоприятных случаях).



Рис. 47. Принципиальная схема снижения производства осадка на очистных сооружениях

Поскольку уменьшение массы осадка получают за счет органической фракции (минеральные вещества в основном находятся в растворе и проходят очистное сооружение насквозь), технологии снижения производства осадка используются только в отношении ила, который проходит через аэратор и рециркулируется в аэротенк. Подобная обработка осадка после первичного отстаивания не производится.

Компания «Дегремон» предлагает два различных способа снижения производства осадка (ила) один основан на химическом окислении озоном — способ **Biolysis O**, другой — на ферментативном гидролизе органических веществ (ОВ) — способ **Biolysis E**.

4.1. Общие соображения

Интеграция технологии снижения производства осадка (ила) в технологическую линию обработки сточных вод затрагивает функционирование и параметры различных установок очистных сооружений. Внедрение этой технологии требует рассмотрения общей проблематики обработки воды и осадка в комплексе.

■ Биологический реактор (аэротенк)

Солюбилизация ила сопровождается высвобождением легко биоразлагаемых ОВ и питательных веществ, поглощаемых активной биомассой. Эта добавочная нагрузка возрастает настолько, насколько интенсивно проводится снижение производства осадка. Минерализация углеродной и азотной фракций (нитрификация)

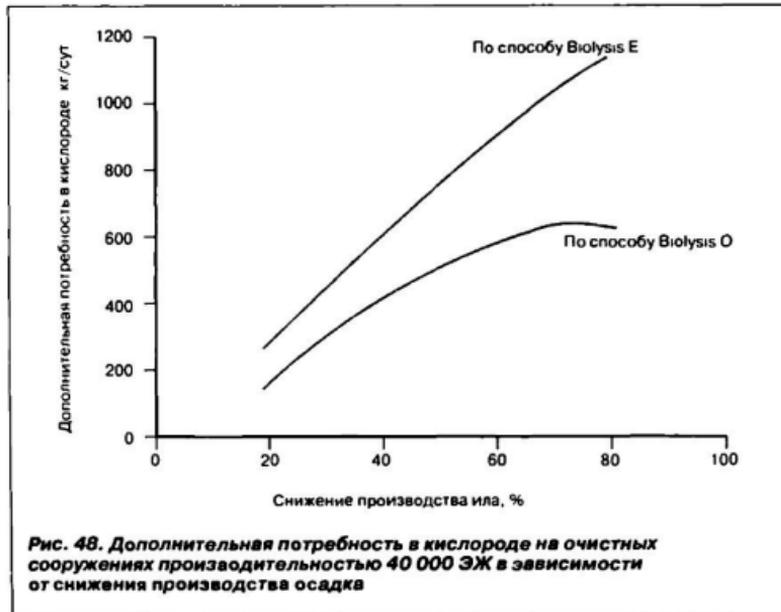


Рис. 48. Дополнительная потребность в кислороде на очистных сооружениях производительностью 40 000 ЭЖ в зависимости от снижения производства осадка

влечет за собой дополнительную потребность в кислороде, которая может достигать 40 % от обычной потребности очистных сооружений (рис. 48)

Кроме того, снижение производства ила сопровождается ростом его **минерализации** примерно на 10 % С другой стороны, озонирование прямым образом действует на нитчатые бактерии и ограничивает их рост Таким образом, технология снижения производства осадка повышает надежность технологической линии обработки сточных вод и дает возможность увеличить концентрацию активного ила в биологическом реакторе

■ Проблема сброса очищенной сточной воды и осадков

Солюбилизация (гидролиз) ВВ также высвобождает фракцию ОВ, неразлагаемых биологическим путем (клеточные структуры, продукты метаболизма микробов и т. д.), за счет которой после разбавления сточными водами, поступающими на станцию, **несколько повышается величина ХПК** обработанной воды (на 5–15 мг O_2/l) Этот небольшой -довесок- пропорционален величине снижения производства осадка (ила)

Таким же образом при сокращении избыточного ила в обработанную воду высвобождается ранее ассимилированный фосфор, концентрация которого изменяется в зависимости от типа используемого процесса обработки ила

Технологии снижения производства осадка оказывают слабое влияние на **состав ила** Снижение содержания ОВ примерно на 10 % при установившемся режиме позволяет, тем не менее, сохранить вполне достаточную для сжигания ила низкую теплоту сгорания Агрономические качества получаемого осадка позволяют использовать его в сельском хозяйстве за исключением случаев, когда в исходном иле (до проведения процесса его обработки) концентрация тяжелых металлов и микрорегриязнителей уже приближается к предельным нормам

4.2. Способ Biolysis E: снижение производства осадка ферментативным путем

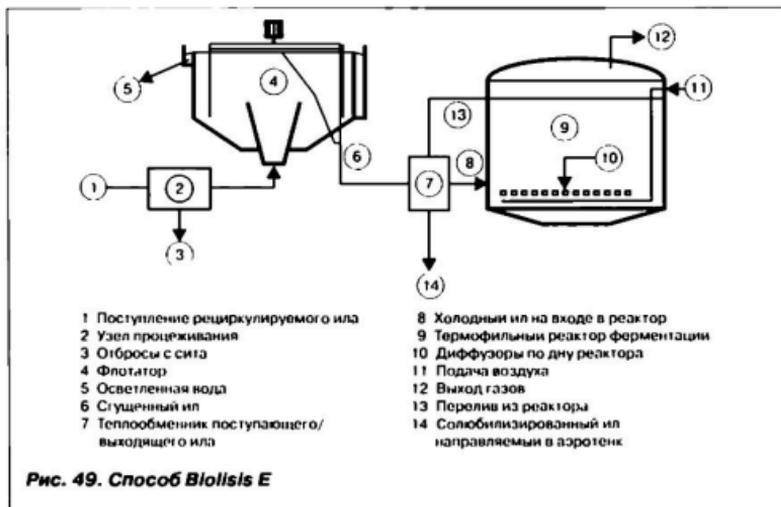
4.2.1. Принцип действия

Активный ил, отведенный непосредственно из системы его рециркуляции от осветлителя, после сгущения направляется в термофильный аэробный реактор Условия, поддерживаемые внутри и снаружи реактора, благоприятны для развития термофильных микроорганизмов, одна из особенностей которых заключается в выделении специфических гидролитических ферментов (протеаз, амилаз, липаз и т. д.) Сочетание температуры и ферментативного гидролиза приводит к эффективной солюбилизации ВВ с превращением их в легко биоразлагаемые соединения, которые затем минерализуются в биологическом реакторе (рис. 49)

4.2.2. Концепция

■ Процеживание

Защита оборудования (приборов и теплообменников) от засорения и забивания обеспечивается процеживанием биологического ила перед его сгущением. Установку оборудовать системой автоматической чистки и винтовым прессом для уменьшения объема удаляемых отходов.



■ Сгущение

Сгущение выполняет две функции:

- **внесение достаточного количества субстрата** (разлагаемых ВВ) для поддержания высокой биологической активности в термофильном реакторе. Необходимая минимальная концентрация составляет 15 г сухих веществ на 1 л осадка;
- **уменьшение размера** термофильного реактора. При одной и той же массовой нагрузке чем больше концентрация ила на входе в реактор, тем компактнее может быть реактор

Сгущение ила выполняется, как правило, флотацией, хотя можно использовать и другие технологии: статическое уплотнение, центрифугирование, процеживание. При этом важно учитывать дополнительные расходы на использование полимера (флокулянта).

■ Реактор

Чтобы определить сочетание условий, способствующих хорошему развитию термофильных микроорганизмов, продуцирующих ферменты для солюбилизации ила, изучались разные конструкции реакторов и режимы работы.

В реакторе должна поддерживаться температура между 55 и 65 °С. Поскольку интенсивность окисления в системе недостаточна для выработки эндогенного тепла, необходим внешний подогрев. Он производится через внешние теплообменники, питаемые горячей водой и соединенные параллельно. Конструкция теплообменников предусматривает предотвращение потерь тепла (теплоизоляция, кожух), кроме того, теплообменники ила позволяют вновь использовать часть тепла от ила, выходящего из реактора.

Поскольку термофильные микроорганизмы также микроаэрофильны, концентрация растворенного кислорода поддерживается на уровне ниже 0,5 мг/л. Аэрация и перемешивание выполняются одновременно при действии диффузоров (напри-

мер, типа *Vibrair*. Расчет параметров сети распределения воздуха основан на минимально необходимой мощности перемешивания. Следует предпринять меры для улавливания газов из реактора, содержащих аммиак и иногда выделяющих неприятный запах.

Рекомендуется непрерывная подача ила в термофильный реактор. Однако допускаются остановки на несколько часов при условии поддержания температуры и аэрации в реакторе.

На этапе запуска могут наблюдаться случаи вспенивания, если биологический ил никогда прежде не подвергался энзиматическому стрессу. Для нейтрализации вспенивания достаточно предупредительного введения пеногасителя по сигналам датчика.

Реакторы небольших размеров могут изготавливаться из композитного материала или из стали, а крупные установки — из бетона. Для предотвращения коррозии выполняется специальная облицовка до верхнего уровня жидкости.

4.2.3. Технические характеристики

Способ *Biolysis E* можно применять на существующих или вновь строящихся сооружениях для обработки ПСВ и ГСВ. Можно рассчитывать на снижение производства осадка до 80 % по массе сухих веществ, если продолжительность пребывания жидкости в термофильном реакторе составляет 24–48 ч. Жидкость на выходе из реактора, состоящая из легко усваиваемых соединений углерода (3–5 г/л по ХПК), используется для увеличения эффективности биологической денитрификации и дефосфатации.

Для достижения номинальных характеристик работы системы может потребоваться от одной недели до одного месяца после ввода установки в действие и до 48 ч после недельной остановки при условии поддержания в реакторе температуры, оптимальной для развития бактерий.

На фото 20 и 21 приведены два примера реализации данной технологии. На фото 20 показаны сооружения, на которых с помощью установки *Biolysis E* достигнуто снижение производства избыточного ила на 2,6 т сухих вещества в сутки, т. е. на 70 %. Технологическая линия установки *Biolysis E* состоит из реактора термофильной ферментации объемом 600 м³ и флотатора диаметром 12 м.



Фото 20. Очистные сооружения «Vannes Tohannic» (Бретань, Франция). Производительность 60 000 ЭЖ



**Фото 21. Реактор ферментации —
пилотная установка в Вербери
(Увза, Франция).
Производительность 3000 ЭЖ**

4.3. Способ Biolysis O: снижение производства осадка химическим путем

4.3.1. Принцип действия

Ил, отведенный из биологического реактора, обрабатывается содержащим озон газом и возвращается на вход очистных сооружений (рис 50). Окисляющее действие озона, особенно на ОВ, влечет за собой частичную солюбилизацию ВВ и высвобождение биоразлагаемой фракции. После возвращения в биологический реактор эти соединения разлагаются и минерализуются. Оставшийся в газе-носителе кислород используют для частичного покрытия дополнительной потребности в кислороде при разложении солюбилизованного ила.

4.3.2. Концепция

■ Сгущение

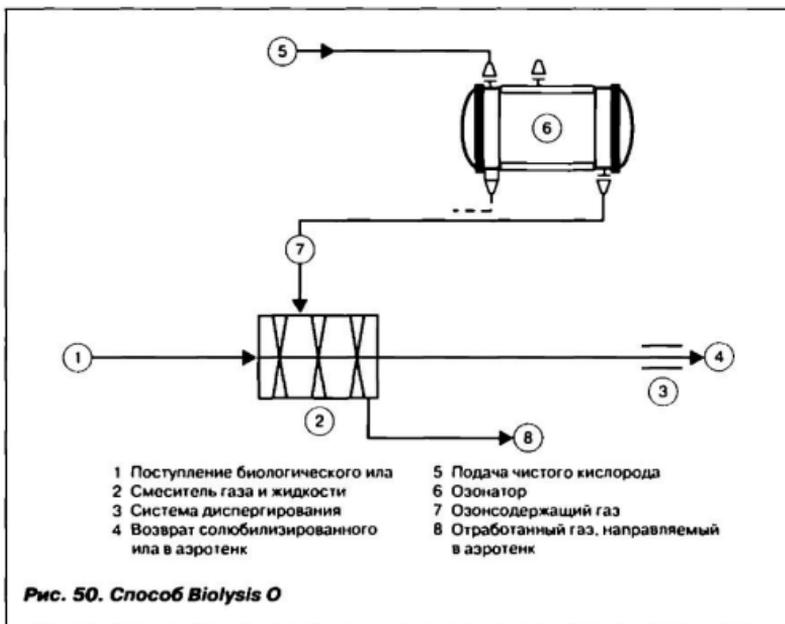
В зависимости от содержания ила в азротенке и режима работы мешалки может оказаться необходимым сгущение ила.

■ Смеситель газа и жидкости

Роль смесителя, специально разработанного для данного способа, заключается в обеспечении наиболее полного контакта озона с обрабатываемым илом. Солюбилизация происходит за счет следующих двух процессов, проходящих одновременно:

- разрушение структуры флоккул ила механическим воздействием,
- химическое окисление ОВ, приводящее к лизированию микроорганизмов и, следовательно, к солюбилизации плотной части осадка.

Химические реакции, происходящие между озоном и ОВ, идут с достаточно большой скоростью, что приводит к быстрому — за несколько секунд перемешивания — поглощению всего введенного озона.



■ Производство озона

Процесс обработки ила протекает оптимальным образом, если содержание озона в газе-носителе превышает 10 %. Для этого необходимо получать озон из чистого кислорода (см. гл. 17, п. 4). На малых и средних очистных сооружениях снабжение кислородом может осуществляться из емкости с жидким кислородом, снабженной испарителем, например, «Охудио». На крупных сооружениях необходима отдельная установка для производства кислорода (типа генераторов кислорода PSA, VSA — см. гл. 17, п. 4.1.1).

■ Рекуперация кислорода

Жидкость после смесителя, обогащенная растворенным и газообразным кислородом, возвращается в аэротенк. Устройство для распределения позволяет вернуть значительную часть кислорода для компенсации возросшей потребности ила в кислороде, возникшей в результате его обработки.

4.3.3. Технические характеристики

Способ **Biolysis O** можно использовать на существующих или вновь строящихся сооружениях очистки сточных вод. Можно рассчитывать на снижение производства осадка до 80 % по массе сухих веществ (рис. 51). При любом выбранном уровне снижения производства осадка способ **Biolysis O** повышает надежность работы технологической линии обработки сточных вод, подавляя размножение нитчатых бактерий, вследствие чего иловый индекс остается в пределах 50–80 мг/г (рис. 52).



С другой стороны, изменение структуры флоккул осадка позволяет получить лучшие показатели влажности при последующем обезвоживании излишков ила. Установка по способу **Biolysis O** легко модифицируется в зависимости от потребности биологического реактора в кислороде. Для этого достаточно изменить коли-



чество вводимого озона или массу ила, направляемого в смеситель. Полезно проводить снижение массы ила во время периодов низкой нагрузки (по ночам, в конце недели), чтобы использовать запас производительности воздухоподувного оборудования

5. Программы расчета параметров биологических процессов: Ondeor

Расчет параметров очистных сооружений может выполняться в общем виде на основе обобщенных параметров, соответствующих конкретной величине производительности, выраженной в ЭЖ. Такой подход дает грубую оценку необходимого объема резервуаров

Однако для точного определения параметров с учетом особенностей очистных сооружений, а главное — качества подлежащей обработке сточной воды необходимо воспользоваться специальным **программным обеспечением**

С этой целью компания «Дегремон» разработала **серию собственных программ Ondeor** для расчета параметров сооружений с активным илом, с биофильтрами и мембранными биореакторами

Алгоритмы расчета, использованные в этих программах, базируются на основных теоретических формулах [уравнения Моно (Monod), влияние температуры на кинетику и т.д.], подкрепленных результатами долгосрочных наблюдений на действующих сооружениях. Особенно это относится к расчету эффективности первичного отстаивания, кинетики нитрификации и денитрификации, биологического удаления фосфора к производству осадка и потребности в кислороде

Кроме того, необходимые первичные данные основываются на типологии сточных вод (см. гл. 4, п. 1.9). Все компоненты каждого параметра, характеризующего загрязнение, рассчитываются по отдельности, особенно для первичного отстаивания и потребности в растворимых соединениях углерода при биологической нитрификации и дефосфатации и т.д.

Программы серии **Ondeor** позволяют рассчитать в целом технологическую линию обработки, получить такие величины, как площадь первичных отстойников (с физико-химической обработкой или без нее), объемы резервуаров (азробных, анаэробных, анаэробных и др.), объем производства ила, потребность в кислороде, площадь вторичных осветлителей, и определить тип третичной обработки в соответствии с нормами сброса, а также учесть при этом любые особенности предусмотренных технологий и конкретных способов (например, разных вариантов обработки активным илом, биологической обработки на биофильтрах типа **Biofor**, на установках **Ultrator**, **Cyclor**, **Météor**, **Bioyls** и т.д.)

Определение и расчет линии обработки осадков позволяет оценить **объемы возвратов загрязненных потоков** от нее, которые в зависимости от своего состава и технологической линии очистных сооружений подаются либо в первичный отстойник, либо в биологический реактор. При этом частицы и растворимые соединения рассматриваются по отдельности: всякое растворенное загрязнение считается как дополнительное, а всякое загрязнение минеральными частицами считается инертным, проходящим через очистные сооружения на установку обработки осадка. Эти возвраты, как правило, составляют порядка 2–15% от расхода исходной сточной воды и содержащихся в ней загрязнений в зависимости от выбранной технологической линии обработки осадков

Учет возвратов влечет более или менее значительные поправки в расчет технологических линий обработки воды и осадка.

В табл. 12 приведены примеры расчета параметров для одних и тех же очистных сооружений с производительностью $10\,000\text{ м}^3/\text{сут}$ в нескольких вариантах: большая или меньшая концентрация сточных вод, учет возвратов от обработки осадка, наличие или отсутствие первичного отстаивания.

Исходные данные.

- расход сточных вод $10\,000\text{ м}^3/\text{сут}$,
- температура $12\text{ }^\circ\text{C}$,
- общий азот на выходе 15 мг/л

Технология очистки активным илом, первичная аноксия, аэрация, осветление с первичным отстаиванием или без него

Как можно видеть из этих примеров, отношение БПК — НК существенно влияет на расчет денитрификации:

— в **примере 1** БПК исходной сточной воды позволяет денитрифицировать только $2/3$ азота. Оставшаяся часть будет денитрифицирована по кинетике эндогенного дыхания ила более медленной, вследствие чего требуется увеличение объема аноксидной зоны,

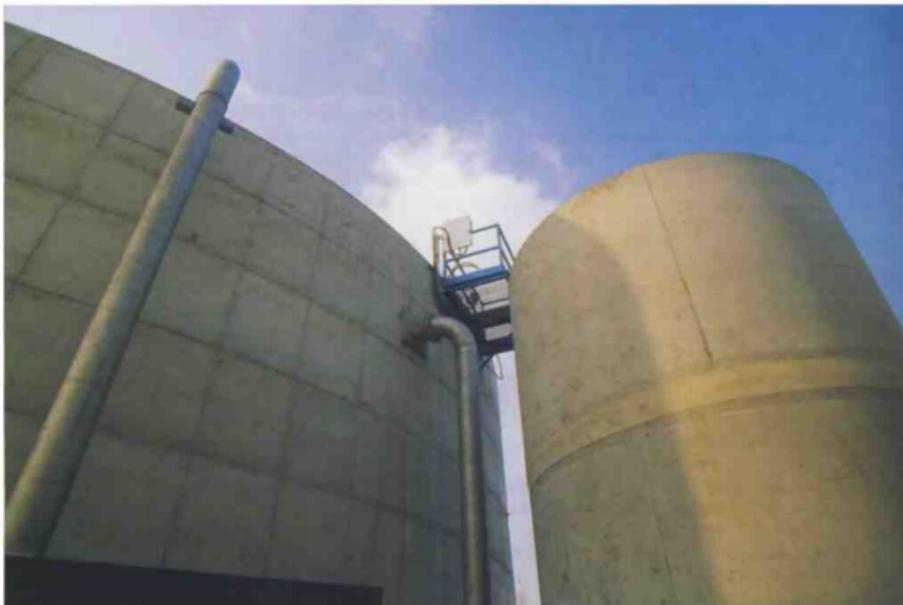
— в **примере 2** большая величина БПК при том же содержании НК позволяет использовать кинетику экзогенной реакции для полной нитрификации азота. Объем аноксидной зоны уменьшается на 3100 м^3 в сравнении с примером 1, и также существенно снижается степень рециркуляции смеси сточной воды и активного ила. На сооружениях, обрабатывающих в 1,6 раза больше БПК, объем азотенка возрастает на 2200 м^3 , а также сильно возрастает количество фосфора, поглощенного простой ассимиляцией. Как можно заметить, возрастание потребности в кислороде не строго пропорционально возрастанию содержания БПК₅. В самом деле рост потребности на окисление углерода компенсируется снижением потребности на окисление азота, поскольку естественная ассимиляция последнего усиливается, а содержание биомассы в бассейне уменьшается;

— в **примере 3** учитываются возвраты от обработки осадков сгущением, сбраживанием и обезвоживанием. Это, особенно по растворенным веществам, влечет за собой увеличение объемов (особенно аноксидной зоны) и степени рециркуляции смеси — 110 вместо 70 %,

— в **примере 4** можно увидеть влияние первичного отстаивания по сравнению с примером 3. Объем резервуаров значительно снижен. Однако общее производство осадков, включая осадки из первичного отстойника, повышается, и возвраты от их обработки, в свою очередь, также возрастают.

Таким образом, программное обеспечение для расчета параметров сооружений биологической очистки позволяет разработчику просчитать несколько вариантов конфигураций, оптимизировать проект и определить общую стоимость очистных сооружений (см. гл. 23).

Тем не менее для расчета параметров сложных технологических линий или для учета ситуаций с сильными колебаниями концентрации загрязнений совершенно необходимо использование средств моделирования (см. гл. 4, п. 2.1.5).



Глава

12

1.	ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	960
2.	СВОБОДНЫЕ КУЛЬТУРЫ	963
3.	ФИКСИРОВАННЫЕ КУЛЬТУРЫ	967
4.	ЗАПУСК УСТАНОВОК МЕТАНИЗАЦИИ И УПРАВЛЕНИЕ ИХ РАБОТОИ	969

Метановое сбраживание

Для переработки осадков образующихся на городских очистных сооружениях уже на протяжении примерно ста лет используется метод метанового сбраживания (метанизация). Он позволяет уменьшить долю летучих компонентов, а соответственно, и общую массу осадков, гомогенизировать их (сбраживание с перемешиванием в течение 15–20 дней) и отрегулировать некоторые характеристики влаготдачи. При этом процесс является минимально энергоемким, так как энергия, требуемая для нагрева и перемешивания, компенсируется энергией, получаемой из образующегося биогаза.

Достоинства метода (см гл. 4, п. 3) — в основном это снижение БПК₅ при низких энергетических затратах и малом количестве образующегося избыточного ила — позволяют использовать метановое сбраживание и для предварительной обработки промышленных сточных вод (ПСВ) с высоким содержанием растворенных органических веществ.

В течение 20 лет компания «Дегремон» разрабатывала различные варианты технологического оформления этого метода с использованием либо свободных, либо фиксированных биокультур (табл. 1). Реакторы, в которых осуществляется процесс сбраживания, называются **метантенками**.

В данной главе рассматривается только метанизация сточных вод. Сбраживание же непосредственно осадков описывается в гл. 18, п. 4.

Таблица 1

	Тип реактора	Название	Область применения
Свободные культуры	Общая смесь	См гл 18, п. 4	Осадки и навозная жижа
	Анаэробный контакт	Analift	Сильноконцентрированные сточные воды
	Слой гранулированного осадка	Anapulse	Сточные воды с небольшим количеством взвешенных веществ
Фиксированные культуры	Псевдооживенный слой гранулированного носителя	Anaflux	Сточные воды, легко подвергающиеся биоразложению, с небольшим количеством взвешенных веществ

1. Общие положения

1.1. Подкисление

Иногда следует предусматривать расположение перед метантенком специального резервуара, в котором осуществляется предварительное подкисление сточных вод (гидролиз). Резервуар нужен в следующих случаях.

- при непродолжительном пребывании смеси в реакторе (например, в реакторе **Anaflux**),
 - при повышенном содержании сульфатов в жидкости (> 500 мг/л), что определяется по отношению содержания SO_4^{2-} к ХПК;
 - в присутствии некоторых трудногидролизуемых субстратов.
- Кроме того с помощью резервуара можно регулировать поток загрязнений. Он закрыт в целях предотвращения воздействия кислорода и в большинстве случаев оснащен системой перемешивания.

Частичная рециркуляция стоков из метантенка в этот резервуар позволяет увеличить биомассу и главным образом стабилизировать величину pH, так как обработанный поток имеет достаточно высокую щелочность.

Обычно процесс подкисления проводят в течение нескольких часов (от 2 до 6) с использованием свободных биокультур, хотя в принципе это можно делать и путем применения фиксированных биокультур. Для некоторых субстратов [с высоким содержанием взвешенных веществ (ВВ)] время увеличивают до 24 ч.

1.2. Контроль температуры

Температура влияет на скорость разложения органической материи (закон Аррениуса), кроме того, ее тщательный контроль необходим для поддержания высоких

нагрузок и эффективности обработки сточных вод. Обычно температура в данном процессе поддерживается равной 37 ± 2 °С. Следовательно, необходимо подогревающее устройство. Также рекомендуется наружные теплообменники, желательны слабо чувствительные к влиянию ВВ.

При непродолжительном пребывании смеси в реакторе чаще всего подогревает-ся входящий поток сточных вод. При более длительном процессе (больше недели) нагревать следует содержимое реактора теплообменниками в виде концентрических труб (см. п. 2.1).

Однако, если не требуется сохранять нагрузку по загрязнениям и эффективность обработки на максимальном уровне и процесс ведется при более низких температурах (> 25 °С), метантенк можно и не нагревать.

Примечание Если температура уменьшается на 10 °С, то для поддержания постоянной эффективности процесса нагрузка должна быть снижена на 30–40 %.

Если поступающие сточные воды имеют повышенную температуру, то может потребоваться система охлаждения.

Примечание Метановое сбраживание в термофильных условиях (≈ 60 °С) проводить труднее, а частые переходы из мезофильных условий в термофильные невозможны — каждый раз нужно наращивать иную биомассу.

1.3. Величина pH

При обработке некоторых ПСВ необходимо повышать их щелочность, чтобы поддерживать значение pH в реакторе около 7. Щелочь добавляют в исходную сточную воду, при этом желательны вводить известь (в случае анаэробного сбраживания), так как это способствует флокуляции и лучшему отстаиванию ила. Напротив, в системах с иловым или псевдооживленным слоем загрузки следует избегать извести — она провоцирует отложение солей. В этом случае рекомендуется использовать каустическую или кальцинированную соду.

1.4. Безопасность

В метантенке предусмотрены следующие элементы защиты:

- клапан выпуска избыточного газа в атмосферу (от повышения давления);
- ввод воздуха или инертного газа через вакуумный клапан (от понижения давления),
- огнезащитный экран (от воспламенения и взрыва в газовых контурах);
- емкость в нижних точках для приема слива (от конденсации воды, которая может блокировать трубопроводы с газом).

1.5. Хранение газа

Газ, полученный при метанизации ПСВ, чаще всего используется в качестве источника энергии непосредственно на предприятии или конкретной установке. Его можно собирать и хранить в газгольдерах, что позволяет компенсировать нестабильность газовыделения и облегчить питание горелок. Подобный газгольдер обычно представляет собой эластичную оболочку, размещаемую в здании. Установку может дополнить и газовый торшер. Если выделяющийся газ составляет значительную часть потребляемого топлива, газгольдер можно не использовать и ограничиться регулированием давления в реакторе.

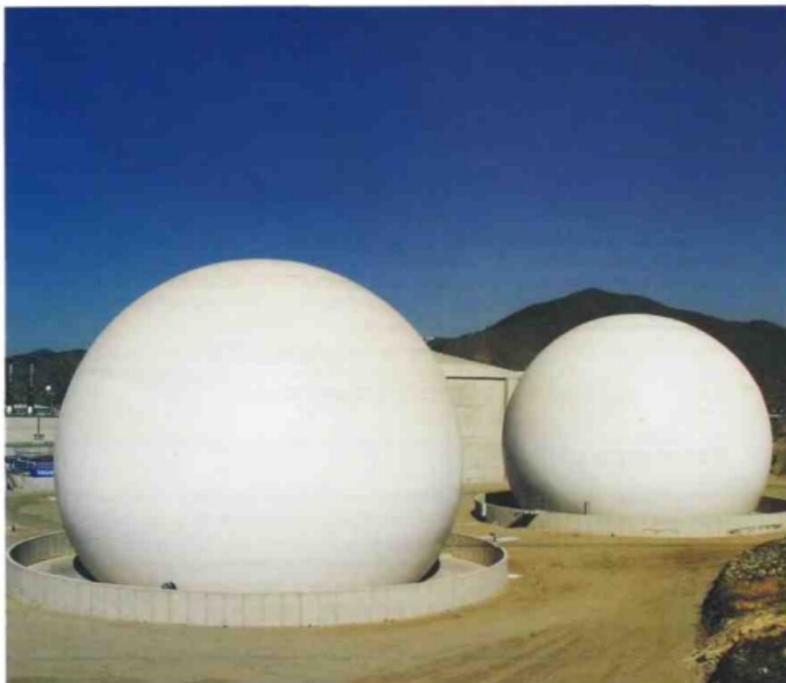


Фото 1. Эластичные газгольдеры. Установки на сооружениях в г. Ла Парфана (Чили). Производительность 3 300 000 ЭЖ (эквивалент-жителей)

1.6. Обработка газа

Помимо метана (70–80 %) и CO_2 (20–30 %) газ, получаемый при метанизации сточных вод, часто содержит H_2S , образующийся при восстановлении находившихся в исходной воде сульфатов

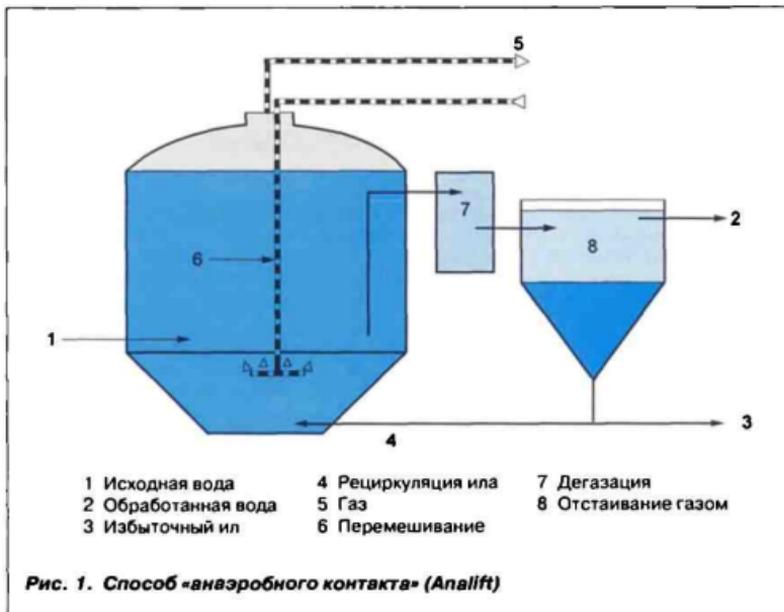
В промышленных сточных водах содержание сульфатов может составлять более 200 мг/л, в этом случае доля H_2S возрастает до 2 % Это может затруднить использование газа для внутренних нужд (он провоцирует коррозию горелок и повышенное содержание SO_x в дымовых газах) Тогда необходимо десульфирование биогаза следующим образом:

- либо в воде при давлении примерно 10 бар,
- либо биологическим окислением с получением элементарной серы, которую затем отделяют отстаиванием (для подобных случаев хорошо подходит система на фиксированных биокультурах типа **Azurair**). Такой прием используется на пивоваренном заводе в Сен-Мигеле (Испания);
- либо связывая ионы S^{2-} оксидами железа.

2. Свободные культуры

2.1. Analift (метантенк с перемешиванием + отстойник-сгуститель)

В данном способе, называемом также **анаэробный контакт**, используется следующее оборудование: реактор с системой перемешивания, отдельный отстойник и устройство для рециркуляции ила, позволяющее поддерживать наибольшую его концентрацию в реакторе (рис. 1)



Между двумя основными аппаратами необходимо устанавливать дегазационное устройство для удаления лишнего биогаза, который может задерживаться в хлопьях и тормозить таким образом процесс их отстаивания

2.1.1. Концепция

■ Реактор

Содержимое реактора необходимо перемешивать для обеспечения гомогенности среды и сглаживания неравномерностей нагрузки по загрязнениям. Перемешивание

вание осуществляется либо введением газа по специальным трубам из неокисляющегося материала (см гл 18, п 4), либо механически (мешалкой)

Реактор может быть бетонным, стальным или пластмассовым. Часто требуется внутреннее антикоррозионное покрытие

Для поддержания постоянной температуры в реакторе требуется обеспечить его хорошую термозоляцию. Иногда этому способствуют благоприятные климатические условия

■ Дегазация

Иловая смесь, вышедшая из реактора, проходит через дегазационный бассейн, роль которого состоит в следующем

- обеспечение плавности перетекания смеси, так как между основными аппаратами существует большая разность уровней,
- удаление газа из жидкости,
- флокуляция ила (если необходимо) посредством медленного перемешивания

Время обработки в бассейне должно составлять не менее 20 мин. При соответствующем расположении оборудования и необходимости осуществлять процесс в закрытом объеме (т.е. наличии укрытия) возникают условия, способствующие применению системы дегазации под частичным вакуумом

■ Отстойник

Отстойник выполняет роль сгустителя, поскольку поступающий ил следует сконцентрировать. Его размеры рассчитываются в зависимости от массового потока, восходящая скорость которого находится в пределах 0,05–0,20 м/ч

Принимаемая степень рециркуляции ила, возвращаемого в процесс, обычно составляет 50–150 %

2.1.2. Применение способа *Analift* и его характеристики

При небольшой нагрузке в интервале 2–10 кг ХПК/(м³ · сут) способ *Analift* мало чувствителен к ее изменению и, следовательно, хорошо приспособлен для обработки концентрированных сточных вод (поступающих от винодельческих, консервных производств, химической и целлюлозно-бумажной промышленности) и суспензий. Также он подходит и для неконцентрированных сточных вод, когда есть риск выпадения в осадок минеральных солей (производство свекловичного сахара)

Разделение функций сбраживания и отстаивания позволяет воздействовать независимо на каждый процесс, в частности, в следующих случаях

- за счет возможности перетекания ила между аппаратами облегчается их обслуживание и запуск,
- облегчаются отгонка H₂S из газа (он образуется при восстановлении сульфатов и может ингибировать дальнейший процесс) и последующая обработка газа,
- облегчается удаление минеральной фракции ила после центрифугирования (при производстве свекловичного сахара происходит известкование участка промывки свеклы)

Эффективность способа по ХПК варьируется от 65 % (перегонка патоки) до 90 % и более (производство свекловичного сахара), по БПК₅ — 80–95 %

2.2. Anapulse (метантенк с иловым слоем)

Метод *Anapulse* применяется чаще всего. Он используется для обработки сточных вод и приводит к образованию гранулированного ила (см гл 4, п 3)



Фото 2. Сооружения в Платтинге (Германия). Сахарное производство «Zudzucker». Мощность 30–38 т ХПК/сут. Метановое сбраживание в реакторе Analfit

2.2.1. Концепция

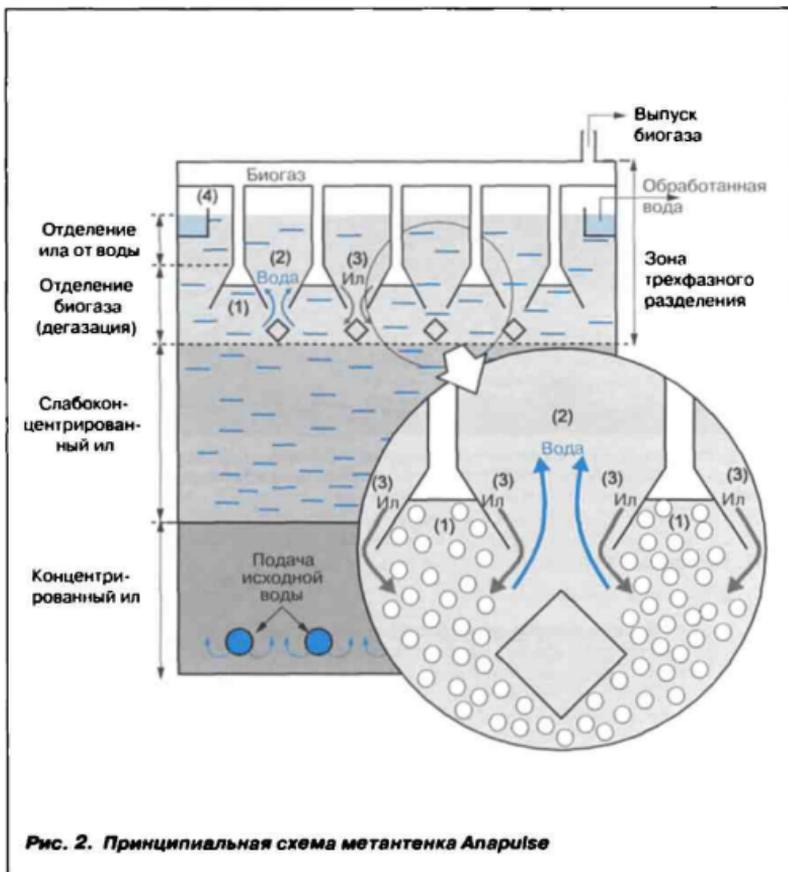
■ Реактор (рис 2)

В реакторе подобного типа создается восходящий поток — исходная сточная вода поступает в нижнюю часть аппарата и проходит через слой ила. Затем она направляется в разделительную зону, где образуется трехфазная смесь: гранулированный ил (часто с прилипшими пузырьками газа), обработанная вода и биогаз. В этой зоне смесь освобождается сначала от биогаза [резким изменением направления потока (1)], затем она направляется в зону отстаивания (2), где ил отделяется и добавляется к фильтрующему слою. Обработанная вода удаляется через слив (4). Было предложено много технологических решений этого процесса, в частности системы тонкослойного отстаивания с параллельными пластинами или в виде «сот» (с перекрестными потоками или противотоком) для облегчения отделения ила от воды. Также надо отметить, что в малых отстойниках самой чувствительной зоной является зона у входа, так как здесь встречаются выходящие частицы ила и поступающая на обработку вода.

Примечания

1 Исходная вода часто подается в импульсном режиме, чтобы обеспечить равномерное ее распределение по всей площади реактора. Подача осуществляется через систему трубопроводов с достаточно большими отверстиями во избежание их закупоривания.

2 Иловый слой перемешивается **только** посредством импульсной подачи исходной воды и в основном выделяющимся газом. Это требует достаточного количества затравки при запуске аппарата, так как в противном случае ко времени гранулирования добавляется время, когда перемешивание будет очень слабым, контакт ила со сточными водами — недостаточным, и, как следствие, скорость процесса будет невысокой.



Реактор может быть бетонным или из защищенной стали. Он должен быть термоизолирован.

2.2.2. Применение способа Anapulse и его характеристики

Способ Anapulse можно использовать для обработки неконцентрированных ($X_{ПК} = 1,5 - 10,0 \text{ г/л}$) и легкоразлагаемых сточных вод (например, пивоварение, производство сладких напитков, бумаги, крахмала и дрожжей). Для сточных вод, содержащих ВВ (глину, карбонат кальция, волокна), он не подходит, так как подобные примеси могут забить выпускное отверстие реактора и зону трехфазного разделения.



Нагрузка для установки **Anapulse** составляет 6–15 кг ХПК/(м³ сут) в зависимости от происхождения сточной воды. Учитывая небольшое время пребывания воды в реакторе (несколько часов), может понадобиться предварительное ее подкисление. В зависимости от происхождения сточных вод эффективность их очистки достигает 70–85 % по ХПК и 75–95 % по БПК₅.

Способ **Anapulse** подходит для предварительной обработки городских сточных вод (ГСВ) в теплых странах, где используется маломинерализованная вода (содержание SO₄²⁻ менее 50 мг/л). При минимальных энергетических затратах здесь можно достичь эффективности 60–80 % по БПК₅ при времени пребывания в реакторе 6–8 ч (при температуре > 25 °С). Выходящая из реактора вода содержит весь азот в форме NH₄⁺, что требует дополнительной ее обработки в биологических прудах (лагунах) в течение ≈ 20 дней либо в аппарате **Biofor C + N**.

3. Фиксированные культуры

В технологиях с использованием фиксированных культур восходящий или нисходящий поток обрабатываемой жидкости проходит через неподвижный слой носителя (пластмасса), на котором формируется тонкая пленка бактерий.

Было предложено несколько вариантов технического решения, но в большинстве из них при эксплуатации в течение 2–3 лет не удается избежать забивания оборудования (например, крупные примеси, осадки), и компания «Дегремон» советует отказать от них в пользу установок с иловым слоем или псевдооживленным (кипящим) слоем

3.1. Анафлюх (фиксированные культуры в псевдооживленном слое)

В реакторе **Anaflux** (рис. 3) бактерии зафиксированы на гранулах в слое, который восходящим потоком обрабатываемой жидкости приводится в псевдооживленное состояние. Это дает следующие преимущества

- максимальная площадь поверхности биопленки на единицу объема,
- оптимальный контакт субстрата с пленкой бактерии.

Подобный реактор позволяет достичь больших концентраций активных биокультур и, таким образом, работать при больших объемных нагрузках

В аппарате **Anaflux** используется специальный гранулированный материал **Bioliote**, имеющий эффективный диаметр гранул менее 0,5 мм. Он был выбран благодаря следующим достоинствам

- пористая структура с большой удельной поверхностью (значит, хорошее фиксирование бактерий),
- малая плотность (приемлемая скорость восходящего потока в кипящем слое ≈ 7 м/ч),
- устойчивость к истиранию,
- строго контролируемый процесс изготовления

3.1.1. Концепция

Реактор **Anaflux** (рис. 3) может быть стальным или пластмассовым. Обычно требуются антикоррозийное покрытие и термоизоляция

Чтобы обеспечить «кипение» материала, необходимо поддерживать скорость потока обрабатываемой воды 5–10 м/ч, что приводит к необходимости ее рециркуляции. Смесь равномерно распределяется в реакторе. Трехфазный разделитель, установленный в верхней части, позволяет удалять газ и возвращать вынесенные гранулы загрузки обратно. Прогрессивное развитие биопленки может привести к чрезмерному «облегчению» загрузки и выносу гранул за пределы аппарата. Отрыв части ила от гранул загрузки в турбулентной зоне реактора позволяет удалять лишнюю биомассу с обрабатываемой водой

3.1.2. Применение способа Анафлюх и его характеристики

Большие нагрузки (30–60 кг ХПК на 1 м³ слоя загрузки при 30%-м его расширении) приводят к малому времени пребывания обрабатываемой воды в реакторе (несколько часов), что требует предварительного ее подкисления

Основные преимущества способа **Anaflux**

- отсутствие риска забивания материала носителя,
- быстрота запуска,
- небольшие габариты реактора;
- возможность изменения расхода в широких пределах

В зависимости от природы сточных вод эффективность их очистки достигает 70–85 % по ХПК и 75–90 % по БПК₅. Способ **Anaflux** подходит для обработки сточных

вод с ХПК более 2 г/л, т е для аграрно-пищевой промышленности (пивоваренной, молочной, винной, производство сладких напитков, дрожжей, крахмала), целлюлозно-бумажной (например, производство бумаги, конденсаты паров), химической и фармацевтической отраслей промышленности

4. Запуск установок метанизации и управление их работой

4.1. Запуск и заправка

При пуске установок метанизации **всегда необходима заправка**. Чем больше биомассы привнесено при заправке, тем меньше требуется времени для ввода аппаратов в работу, особенно если

- биомасса уже адаптирована для обработки данного вида сточных вод (взята из аппарата, с ними работающего),
- биомасса находится в нужном виде, например в виде гранул для установок соответствующего типа

Если заправки нет (или ее очень мало), необходимо постепенно увеличивать нагрузку, при слабом синтезе микроорганизмов (0,1–0,2 кг летучих веществ (ЛВ) на 1 кг удаленной БПК₅) и относительно больших потерях ила (из-за процесса акклиматизации) длительность ввода аппаратов в работу может достигать 6–8 мес!



Фото 3. Очистка кукурузного сиропа с высоким содержанием фруктозы. Пилотная установка Anaflix (диаметр 6 м), Кэригл (США)

Чтобы уменьшить перемещаемые объемы затравки, ее можно предварительно сгущать центрифугированием или фильтрацией (аппараты **GDE, Superpress**). Эти операции должны контролироваться (например, время хранения, доза полимеров).

После периода реактивации реактора и стабилизации температуры (в течение нескольких дней) применяемая нагрузка по ХПК должна быть примерно 0,1 кг на 1 кг ЛВ за 1 сут. затем ее необходимо постепенно повышать, следя за тем, чтобы отношение летучих жирных кислот (ЛЖК) к полному щелочному титру ТАС оставалось меньше 0,2 и значение pH было равно 7

Можно попытаться удваивать нагрузку каждые 10–20 дней в зависимости от природы сточных вод и используемого способа

■ Происхождение ила для затравки

При отсутствии уже адаптированного ила можно также использовать

- сброженные осадки от обработки ГСВ;
- отходы животноводства (крупного рогатого скота, свиноводства).

Параметры, позволяющие проконтролировать их состояние до взятия пробы, следующие:

- массовая нагрузка метантенка, из которого берется проба,
- удельная выработка газа. 1 м³ газа на 1 м³ объема реактора в сутки,
- значение pH и рабочая температура;
- процентное содержание ЛВ в иле

■ Необходимое количество затравки

Реактор **Analift** 3–5 кг ЛВ на 1 м³ реактора

Реактор **Anapulse**. 20–60 % от объема реактора с гранулированной биомассой (в зависимости от времени, имеющегося для запуска)

Реактор **Anaflux** приблизительно 10 % от объема реактора.

4.2. Рабочие параметры

При нормальном режиме эксплуатации необходимо контролировать следующие параметры

- при ацидогенезе: величина pH, отношение ЛЖК/ХПК, температура;
- при метановом сбраживании
 - температура;
 - ЛЖК: обычно менее 500 мг/л,
 - отношение ЛЖК к титру ТАС менее 0,2 (мг/л на мг/л CaCO₃);
 - pH = 7,0±0,3;
 - выработка газа: около 0,40±0,05 м³ на 1 кг извлеченной ХПК,
 - доля CO₂ в газе, которая должна быть постоянной (20–30 %).

Нарушение нормального режима обычно выражается в понижении величины pH, повышении содержания CO₂ в газе, за которым следуют уменьшение выработки газа и повышение концентрации водорода в нем. Тогда необходимо быстро принять следующие меры.

- уменьшить нагрузку,
- проанализировать упомянутые параметры и характеристики подлежащих обработке сточных вод для того, чтобы понять причины сбоя.

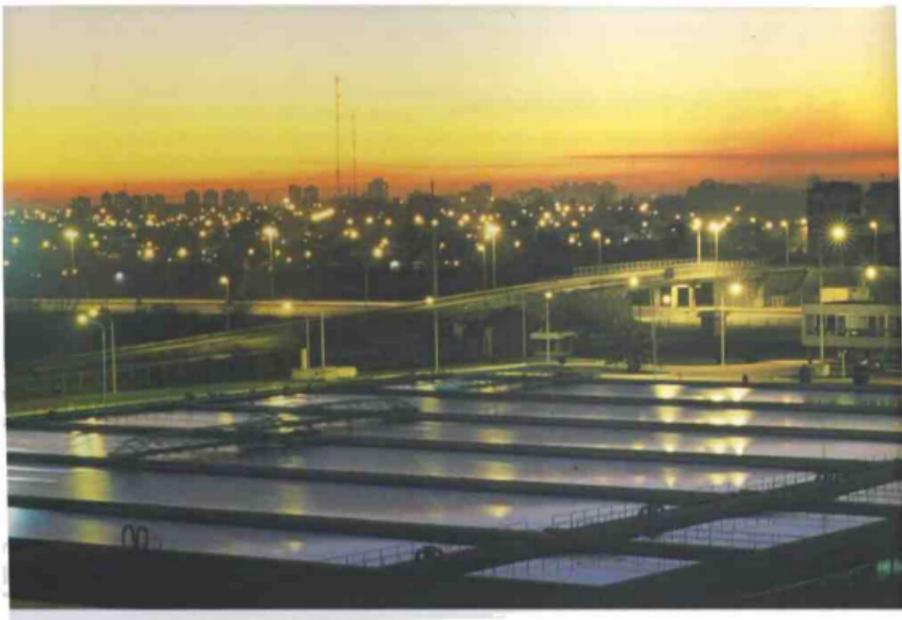
Причиной постепенного снижения рабочих показателей может являться недостаток нутриентов (N, P) или олигоэлементов (Ni, Co и т. п.). Необходимо также проверить способность сточных вод к биоразложению (возможно присутствие ингибиторов и т. д.)

4.3. Дальнейшая обработка

Как было показано, чтобы получить требуемые значения по ХПК, БПК₅ и тем более по содержанию NH_4 (соответственно, и по общему азоту) метанового сбраживания обычно бывает недостаточно. Для этого необходима аэробная доочистка.

Можно использовать (в зависимости от норм сброса загрязнений) аэробные методы, рассмотренные в гл. 4, п. 2, и в гл. 11. Отметим, что анаэробный осадок, приносимый в систему с активным илом, ведет себя как инертный, образуя биохлопья и не требуя значительных количеств кислорода.

Если сточные воды содержат повышенное количество сульфатов, то вода, вышедшая из метантенка, работающего в равновесном режиме по газу, также будет обогащена ионами S^{2-} , которые лучше удалить перед дальнейшей обработкой. Это можно осуществить либо в системе с каталитическим окислением, либо биологическим путем на фиксированных биокультурах, позволяющих окислить сульфиды до свободной серы и удалить последнюю отстаиванием промывных вод.



Глава

13

1.	ФИЛЬТРЫ С ГРАНУЛИРОВАННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ.....	973
2.	НАПОРНЫЕ ФИЛЬТРЫ	980
3.	ОТКРЫТЫЕ ФИЛЬТРЫ.....	985
4.	ОСОБЫЕ ФИЛЬТРЫ.....	995
5.	КОНТРОЛЬ ЗА РАБОТОЙ ФИЛЬТРОВ И ИХ РЕГУЛИРОВАНИЕ.....	1003

Фильтры

Законы и общие механизмы фильтрации, так же как и проблематика промывок фильтров, рассматривались в гл 3, п 5 Эта глава посвящена характеристикам различных фильтров компании -Дегремон-

Разнообразие гранулированных фильтрующих материалов приводит к созданию большого числа фильтров, которые можно классифицировать согласно гидравлическим условиям их использования по способу промывки (табл 1) или по принципам их работы (см п 5)

- с постоянным расходом в процессе загрязнения,
- с постоянным расходом и компенсацией забивания загрузки с помощью специального сифона или задвижки,
- с убывающим расходом

1. Фильтры с гранулированными материалами

Прежде всего следует напомнить общие технические положения для различных типов фильтров с гранулированной загрузкой, которые касаются

- условий эксплуатации,
- внутренних устройств распределительной системы промывки

1.1. Условия эксплуатации

1.1.1. Циклы

Почти все фильтры с гранулированными материалами работают циклами, состоящими из периода фильтрации, за которым следует промывка для восстановления

Таблица 1
Различные группы фильтров компании «Дегремон»

Тип промывки	Напорные фильтры	Открытые фильтры	Особые фильтры
Промывка только водой Однородный слой песка, антрацита или материала Médiallo	Hydratur		ABW Самопромывающийся фильтр Filtrazur Greenleaf
Промывка одновременно водой и воздухом Однородный слой песка	FEC M FH S FV2B	Aquazur T, V	Colexer
Промывка сначала воздухом, потом водой Двойной слой Однородный слой гранулированного активированного угля (ГАУ)	FEC B FHL	Mediazur B, BV Carbazur G, GH, V, DF	

фильтрующей способности. Основным параметр, ограничивающий продолжительность этих циклов, — потеря напора, но кроме максимально допустимой потери напора более важными могут оказаться и другие параметры

- объем фильтрата или длительность цикла (например, 8, 24, 48 ч);
- мутность фильтрата, контролируемая измерителем мутности или даже счетчиком частиц

Максимальная потеря напора определяется

- имеющимся в наличии гидравлическим напором (высота гравитационной подачи или характеристика насосов, которые, в свою очередь, выбираются в зависимости от приемлемого потребления энергии) и/или гидравлическим сопротивлением дренажной системы фильтра (это касается напорных фильтров),
- **сохранением качества фильтрата** в течение всего цикла, что особенно важно при фильтрации подпиточной или питьевой воды. В обработке некоторых видов промышленных вод это условие может не выполняться, и потому напорные фильтры могут работать с высокими потерями напора (от 0,5 до 1,5 бар), тогда имеет значение только усредненное качество воды.

1.1.2. Запуск фильтра в работу после промывки

При вводе в работу после промывки каждого фильтра фильтрующей батареи нужно избегать его перелива. Это особенно важно, когда количество фильтров невелико, равнопоточное распределение обрабатываемой воды до или после фильтров обеспечивает наилучшее качество фильтрата.

В некоторых случаях даже без перелива при высоких требованиях к качеству фильтрованной воды уместно слить первую порцию фильтрата, имеющего более плохое качество либо из-за очень высокой скорости фильтрации воды, либо если вода предварительно не прошла осветление, например для выполнения гарантии мутности ме-

нее 0,2 или даже 0,1 NTU (нефелометрическая единица мутности), соблюдения требуемой величины индекса забивания мембраны и др. Эту фазу работы часто называют созреванием фильтра

1.2. Поддержка загрузки

Поскольку эффективный размер (см гл. 5, п. 7.1.1) зерен загрузки может на практике варьироваться от 0,25 мм (гранат или песок) до 2 мм (песок) или 5 мм (антрацит), фильтрующий материал может поддерживаться

- или несущим полом, снабженным дренажными колпачками со щелями, ширина которых меньше размера гранул материала,
- или поддерживающим слоем (гравий, гранат и т. д.), если размеры гранул фильтрующей загрузки и щели колпачков не соответствуют друг другу

Поддерживающий слой высотой от 5 до 40 см может состоять из 2–4 подслоев с различным гранулометрическим составом в зависимости от происхождения материалов и системы распределения (разветвленные трубопроводы или дренажные колпачки), которую он защищает

1.3. Промывка фильтров

Промывка всегда осуществляется восходящим потоком воды или воздуха и фильтрованной воды (см гл. 3, п. 5), кроме особых случаев, когда фильтрующие материалы легче воды (фильтр *Filtrazur*)

1.3.1. Распределение промывающих воды и воздуха

Под фильтрующей загрузкой должна быть предусмотрена система распределения потока воды или воздуха, при этом к подаче воздуха предъявляются особые требования. Существуют два вида устройств ввода воды и воздуха

- простые коллекторы, распределяющие только воду, возвращаемую для промывки,
- устройства, формирующие воздушную подушку под несущими полами или в специальных коллекторах (промывка водой и воздухом)

1.3.1.1. Устройства для противоточной промывки только водой

Они могут состоять из разветвленных трубопроводов, подключенных к центральной камере или к поперечному коллектору распределения. Разветвленные трубопроводы обычно имеют перфорацию или щели, обеспечивающие распределение воды

1.3.1.2. Устройства, формирующие воздушную подушку

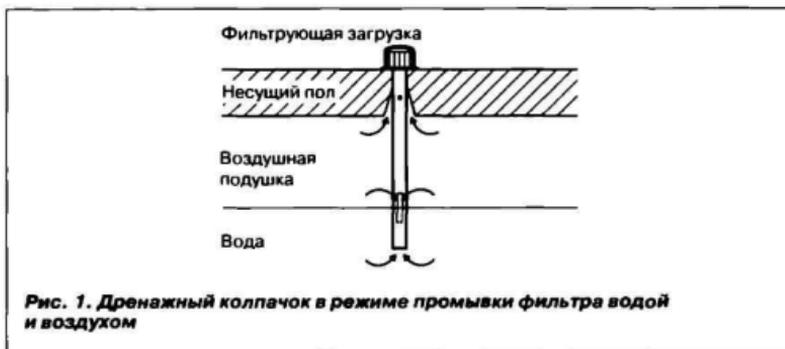
Поддержание воздушной подушки, необходимой для распределения смеси воды и воздуха, обеспечивается благодаря использованию трубчатых дренажных колпачков. На рис. 1 показан разрез длиннотрубчатого дренажного колпачка, закрепленного в бетонном несущем полу, в режиме промывки водой и воздухом

Этот дренажный колпачок состоит из головки с узкими щелями, препятствующими прохождению частиц фильтрующего материала, и трубки с отверстием в верхней части и со щелью в нижней части

Воздух, поданный под несущий пол, формирует воздушную подушку. Затем воздух начинает поступать в отверстия и щели дренажных колпачков, в них образуется

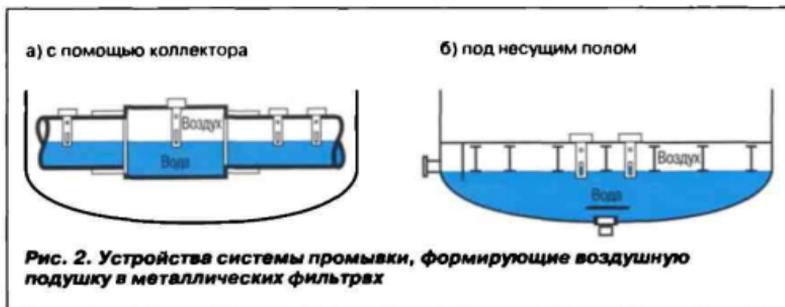
смесь воздуха и воды, которая в результате равномерно распределяется по всей площади фильтра. Такая особо эффективная система промывки позволяет экономить промывную воду.

Чтобы избежать образования зон уплотнений в фильтрующей загрузке, нужно



установить порядка 55 дренажных колпачков на 1 м^2 несущего пола с расходом противоточного потока воздуха примерно от $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ через каждый колпачок.

Промывка с использованием воздушной подушки может быть реализована на металлических фильтрах двумя способами (рис. 2).



■ Легкие фильтрующие материалы

Для предотвращения выноса фильтрующей загрузки, который может происходить при промывке одновременно водой и воздухом, промывка проводится в два последовательных этапа — фильтры обычно промываются сначала воздухом, а потом водой (см. гл. 3, п. 5.4.4). Для предотвращения присутствия воздуха в начале промывки только водой сеть трубопроводов продувки должна собирать остаточную воздушную подушку и удалять ее за пределы фильтра. В этом случае верхнее отверстие колпачка должно располагаться ниже несущего пола и отверстий продувки.

■ Плотные фильтрующие материалы

Для промывых одновременно воздухом и водой плотных фильтрующих материалов присутствие воздуха в начале промывки только водой не представляет никакого риска, если фильтр оборудован так называемыми самоочищающимися дренажными колпачками (см рис 1) после промывки воздухом воздушная подушка удаляется через верхнее отверстие трубки дренажного колпачка, и удаление заканчивается в процессе фазы промывки только водой. В этом случае верхнее отверстие дренажного колпачка расположено выше нижней поверхности несущего пола. Таким образом, фильтры, промываемые одновременно воздухом и водой, не имеют специальной сети продувки.



Фото 1. Дренажные колпачки компании «Дегремон» для промывки воздухом и водой: а — колпачок 4DS27 из пластмассы с кольцом заделки в несущий пол Azurfloor; б — колпачок D25 из пластмассы с кольцом крепления на металлическом несущем полу

Опыт компании «Дегремон» позволил разработать разные типы дренажных колпачков (фото 1), оптимизированных для различных способов фильтрации, на основе материалов, стойких в более или менее агрессивных средах.

1.3.2. Потребление промывной воды по отношению к объему фильтрата

Потребление промывной воды по отношению к объему фильтрата сильно зависит от концентрации взвешенных веществ (ВВ), их природы и от температуры воды. Но все-таки для фильтрации предварительно осветленной воды можно дать приближительные величины этого отношения:

- 1–3 % для промывки «воздух и вода» однослойных фильтров (Aquazur),
- 2–4 % для промывки «воздух, потом вода» двухслойных фильтров (Médiazur)

1.4. Несущие полы открытых бетонных фильтров

Качество проектирования и создания несущего пола является важнейшим элементом для обеспечения хорошей работы фильтра, несущий пол должен обеспечивать

- однородное распределение промывающих воды и воздуха, и в особенности последнего, что требует строгого соблюдения горизонтальности;
- водо- и воздухо непроницаемость, особенно в фазе промывки,
- механическую прочность под действием усилий, направленных вверх (в режиме промывки) и вниз (в режимах фильтрации, быстрых опорожнений),
- длительное функционирование без вмешательства со стороны

Несущие полы с дренажными колпачками компании «Дегремон» были разработаны в целях соблюдения всей совокупности этих требований



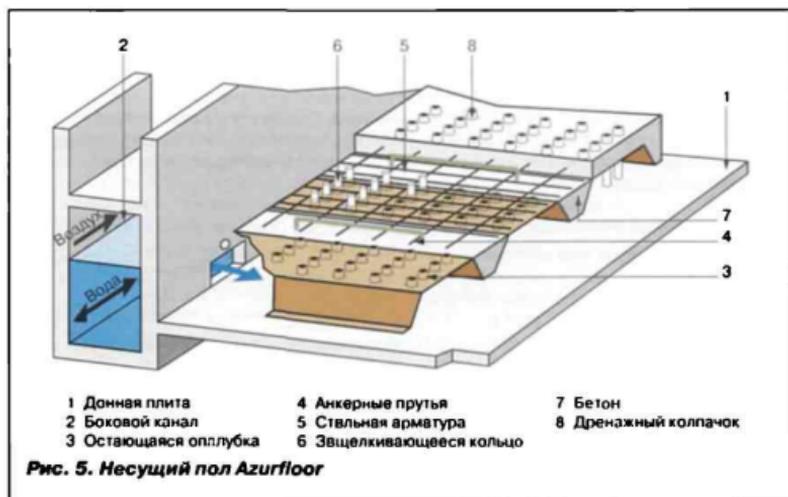
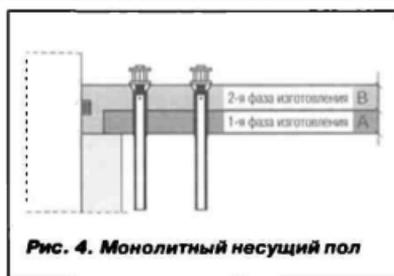
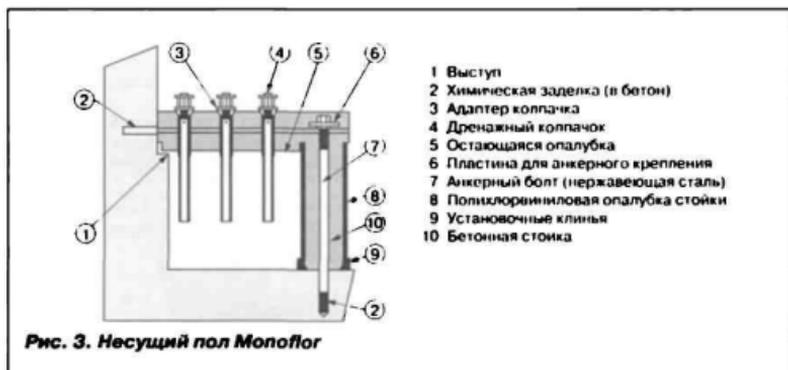
Фото 2. Несущий пол из предварительно изготовленных бетонных плит

Если необходим доступ в пространство под несущим полом фильтра, то пол укладывается на систему из балок и/или опор, в таком случае он может быть сделан.

- из плит армированного полиэстера,
- из предварительно изготовленных бетонных плит (фото 2),
- из монолитной железобетонной плиты

Компания «Дегремон» разработала два типа несущего пола в виде монолитной плиты, несущий пол **Monofloor** (рис 3), плита которого отлита с помощью остающейся в сооружении опалубки из полистирола, и монолитный несущий пол (рис 4), плита которого отлита на предплитах из бетона. Преимущество несущих полов из монолитных плит состоит в упрощенной конструкции и отсутствии уплотнений

Если доступ под несущий пол не нужен, последний можно разместить в глубине фильтра. Несущий пол **Azurfloor** (рис 5) — это пол из бетона, отлитый с помощью остающейся в сооружении опалубки, установленной прямо на днище фильтра. Оснащенный такими же колпачками, что и другие несущие полы компании «Дегремон», он обладает теми же гидравлическими характеристиками. Преимущества несущего пола **Azurfloor** заключаются в легкости изготовления и полном отсутствии уплотнений. Модульный и невысокий, он прежде всего подходит для реконструкции сооружений фильтрования



2. Напорные фильтры

Напорные фильтры изготавливаются из материалов с поверхностным покрытием, приспособленным к условиям применения. Устройства для отвода промывных вод нуждаются в особенно тщательной проработке, они должны обеспечивать равномерный сбор воды.

Напорные фильтры подходят для работы в полностью автоматическом режиме. Компания «Дегремон» имеет опыт реализации напорных фильтров диаметром до 8 м.

2.1. Фильтры с промывкой только водой

Фильтры с промывкой только водой чаще всего загружены одним фильтрующим слоем — из песка или антрацита. Максимальная потеря напора в конце цикла может варьироваться от 0,2 до 2 бар в зависимости главным образом от размера зерен фильтрующего слоя и скорости фильтрации.

Промывка обеспечивается исключительно потоком фильтрованной воды, скорость которого должна быть адаптирована к гранулометрии фильтрующей загрузки и к вязкости воды, а следовательно, и к ее температуре. В табл. 2 приведена скорость промывки для песка при температуре воды от 15 до 25 °C.

Таблица 2

Эффективный размер, мм	0,35	0,55	0,75	0,95
Скорость, м/ч	25–35	40–50	55–70	70–90

Для нормальной работы фильтра важно контролировать скорость промывки, это легко осуществляется с помощью измерительного гребня (порога), установленного в колодце сбора загрязненных промывных вод. Одновременно можно наблюдать за изменением качества отводимой загрязненной промывной воды и регулировать таким образом длительность промывки. Она варьируется от 5 до 8 мин в зависимости от высоты слоя песка и задержанных загрязнений.

■ Вариант реализации

Фильтр **Hydrazur** из стали с покрытием предназначен для больших скоростей фильтрации и может иметь форму двойной колонны (рис. 6). Его характеристики

- высота слоя загрузки от 0,6 м,
- диаметры от 1,4 до 3 м,
- главное применение — обработка воды плавательных бассейнов.

2.2. Фильтры с промывкой одновременно воздухом и водой

Так называются фильтры с одним однородным слоем загрузки, промываемые одновременно воздухом и водой.

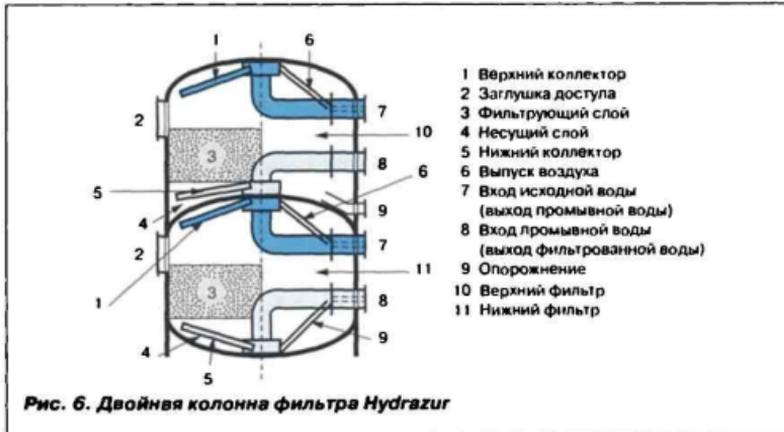


Рис. 6. Двойная колонна фильтра Hydrazur

Фильтрующий слой, однородный по всей высоте, поддерживается металлическим нижним полом или коллектором, погруженным в поддерживающий слой, в котором установлены кольца для винтового крепления дренажных колпачков. Эти фильтры, как правило, загружаются песком, иногда антрацитом.

Обычные характеристики фильтров с промывкой одновременно воздухом и водой следующие:

- гранулометрический состав песка (эффективный размер частиц) 0,55–1,35 мм,
- расход воздуха: $55 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$;
- расход воды во время промывки воздухом: $5\text{--}7 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$,
- расход воды на стадии отмывки только водой: $15\text{--}25 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$;
- потеря напора в конце цикла: 0,2–1,5 бар.

Высота фильтрующего слоя адаптирована главным образом к скорости фильтрации и задерживаемым загрязнениям. Скорость фильтрации обычно находится в интервале от 4 до 20 м/ч. В особых случаях можно использовать фильтр данного типа с высотой слоя от 1 до 2 м и размером частиц песка в пределах от 0,65 до 2 мм. При этом скорости могут достигать:

- 20–40 м/ч для грубой напорной фильтрации вод, загрязненных оксидами (см. гл. 25, п. 8);
- 25–40 м/ч для тонкой фильтрации глубинных морских вод.

Фильтры с промывкой одновременно воздухом и водой очень хорошо приспособлены для работы в составе батареи фильтров большого диаметра и имеют большие преимущества: простота и полная безопасность использования; небольшой мгновенный расход промывочной воды, потребление которой минимально.

Существуют различные модификации фильтров, промываемых одновременно воздухом и водой.

■ Фильтры FV2B

Стандартные вертикальные фильтры FV2B (рис. 7) используются для обработки воды котельных установок и производственных вод, для производства питьевой воды и т. д. Они могут быть сделаны в виде двойной колонны, если:

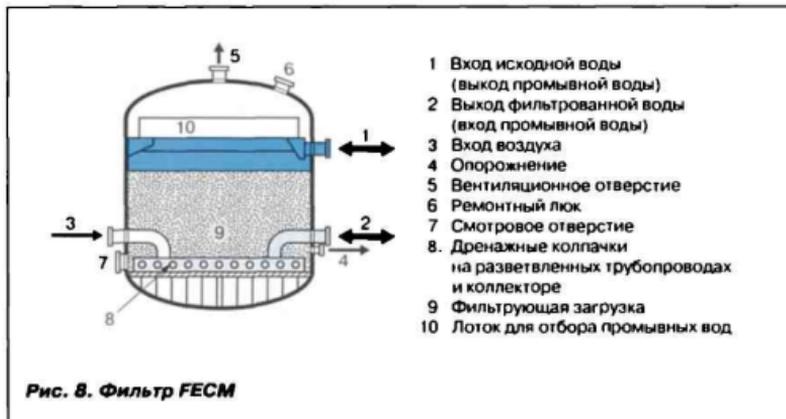
- высота фильтрующего слоя около 1 м;
- диаметры от 0,95 до 3,5 м.



■ Фильтры FECM

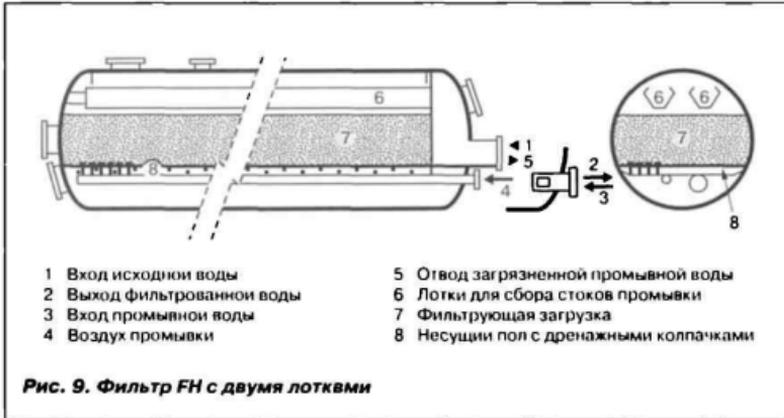
Компактные вертикальные фильтры **FECM** обладают большой скоростью фильтрации и предназначены для обработки коррозионных вод (рис 8) Их характеристики

- высота слоя около 1 м,
- диаметры от 1,6 до 3,5 м,
- покрытие окраской или эбонитом для работы в коррозионной среде,
- применение рассолы, морская вода



■ Фильтры FH

Характеристики горизонтальных фильтров **FH** (тип **FH-S**) с одним или двумя лотками и со специальным устройством сбора промывных вод (рис 9).



- высота слоя около 1 м.
- диаметры от 2,5 до 4 м, длина до 12 м.
- применение: фильтрация больших расходов технологических вод (декарбонатация прокатные станы, морская вода)



Фото 3. Фильтры FH станции «Валів» (Пальмв-де-Мвйорка). Расход 7800 м³/ч

2.3. Фильтры с промывкой последовательно воздухом и водой

Фильтры, о которых шла речь выше, можно также загрузить одним слоем легкого фильтрующего материала (антрацит, пемза, активированный уголь, материал **Biolite**)

или двумя слоями разных материалов (двухслойные фильтры). В последнем случае их промывка требует двух последовательных фаз, и перед продувкой воздухом необходимо снизить уровень воды.

Когда в качестве более мелкого фильтрующего материала двойного слоя используется песок, следует предусмотреть такие же расходы промывной воды, что и для фильтров с промывкой только водой для того же размера зерен песка. Эти расходы превышают те, которые используются для фильтров с одним однородным слоем, поэтому следует заново рассчитать и подобрать трубопроводы, вентили и насос промывной воды. Кроме того, расширение фильтрующего слоя вынуждает приподнимать устройство для отвода промывных вод из фильтра.

В табл. 3 приведены характеристики возможных сочетаний фильтрующих материалов для самого обычного двухслойного фильтрования.

Сочетания		1	2	3
Песок	Номинальный эффективный размер, мм	0,55	0,55	0,75
Антрацит	Номинальный эффективный размер, мм	0,95		1,5
Пемза	Номинальный эффективный размер, мм		1,5	

Примечание. Возможны другие сочетания песок/пемза при условии подбора плотности пемзы (например, песок 0,3 мм и пемза 1,6 мм).

Существуют различные модификации фильтров, промываемых последовательно воздухом и водой

■ Фильтры FECB

Характеристики компактных вертикальных фильтров **FECB** (рис. 10) для коррозионных вод или морской воды:

- высота слоя порядка 1 м;
- диаметры от 1,6 до 3,5 м;
- применения: коагуляция на фильтре, деферризация, декарбонатация.



Рис. 10. Фильтр **FECB**

■ Фильтры FH

Характеристики горизонтальных фильтров FH (тип FH-L) с одним или двумя лотками со специальным устройством для сбора промывных вод (см. рис. 9):

- высота слоя порядка 1 м,
- диаметр от 2,5 до 4 м, длина до 12 м,
- применение: фильтрация больших объемов промышленных вод, морской воды.

3. Открытые фильтры

С учетом их стоимости открытые фильтры, которые строят в основном из бетона, предназначены, прежде всего, для крупных сооружений для производства питьевой воды и очень часто для сооружений осветления технологических или сточных вод.

Чаще всего речь идет о фильтрации предварительно отстоянной воды, иногда после флокуляции на фильтре, и даже о прямой фильтрации воды без добавления реагентов. Способ обработки воды оказывает влияние на конструктивные особенности фильтров и главным образом на общую концепцию батареи фильтров.

Из разработанных компанией «Дегремон» открытых фильтров наиболее часто применяются песчаные фильтры **Aquazur**, двухслойные фильтры **Médiazur** и фильтры с активированным углем **Carbazur**. Во всех этих фильтрах используется оборудование, описанное в п. 1, в частности несущие полы (см. п. 1.4).

3.1. Песчаные фильтры Aquazur

Промывка фильтров **Aquazur** осуществляется по принципу **одновременно воздухом и водой**: воздух с большим расходом и вода с умеренным расходом подаются противотоком на песчаную загрузку, а затем следует отмывка только водой со средним потоком, который не вызывает расширения фильтрующего слоя, так как эта вода играет лишь роль переносчика загрязнений из фильтрующей загрузки к лоткам отвода промывной воды.

Главным образом используются фильтры **Aquazur V**, работающие в стандартных условиях со скоростью от 7 до 20 и даже до 30 м/ч в специальных вариантах этого фильтра, а также в некоторых случаях — фильтры **Aquazur T**, в частности когда пьезометрическая линия очень напряжена.

3.1.1. Фильтры Aquazur V

Повышенная скорость фильтрации (от 7 до 20 м/ч) вызывает необходимость выбора особых технологических решений, касающихся, в частности:

- фильтрующего материала и высоты загрузки;
- способа промывки,
- общей гидравлики.

В результате фильтры **Aquazur V** (рис. 11) характеризуются.

- высоким уровнем воды над слоем фильтрующей загрузки, который равен как минимум 1 м, а в большинстве случаев — 1,20 м;
- высотой однородной фильтрующей загрузки в интервалах 0,8 – 1,5 м;
- эффективным размером зерен фильтрующей загрузки, обычно 0,95 или 1,35 мм (крайние значения — 0,7 и 2 мм),



Фото 4. Фильтр Aquazur, фаза промывки «воздух-вода»

— одновременной промывкой воздухом и водой, которая сопровождается **поверхностным смывом загрязнений исходной водой**, затем осуществляется отмывка только водой без расширения слоя фильтрующей загрузки и с продолжением поверхностного смыва загрязнений. Такой смыв загрязнений с поверхности слоя загрузки ускоряет отвод выделенных загрязнений вне фильтра, что сокращает длительность промывки и, следовательно, потребность в возвращаемой для этого фильтрованной воде.

Уровень воды в фильтрах **Aquazur V** регулируется с помощью либо сифона, либо дискового затвора, который управляется устройством **Régulazur** (см. п. 5)

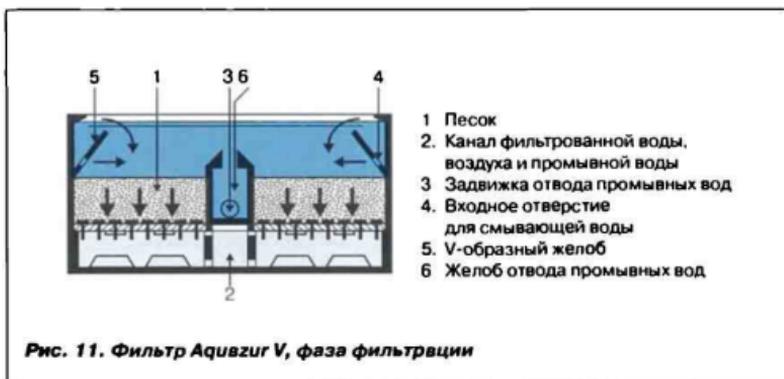


Рис. 11. Фильтр Aquazur V, фаза фильтрации

Батареи фильтров **Aquazur V** могут состоять из простых фильтров (в этом случае каждый фильтр имеет свой регулятор) или двойных фильтров (две сообщающиеся сверху и снизу камеры и один регулятор)

3.1.1.1. Промывка фильтров **Aquazur V**

Промывка осуществляется в следующей последовательности (рис. 12)

- понижение поверхности воды до уровня верхних краев желоба отвода промывных вод (6) путем остановки подачи исходной воды.
- создание воздушной подушки,
- продувка введением воздуха и воды, дополняемая поверхностным смывом загрязнений,
- отмывка только водой с продолжением поверхностного смыва до тех пор, пока отводимая вода не станет чистой

Расход воды и воздуха для промывки

- возвращаемой для промывки фильтрованной воды: $7 - 15 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$,
- воздуха $50 - 60 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$;
- воды для поверхностного смыва загрязнений примерно $5 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$,
- воды на завершающей стадии отмывки только водой. $15 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$

С учетом времени работы задвижек промывка длится 10–12 мин и заканчивается заполнением фильтра до его нормального уровня в режиме фильтрации

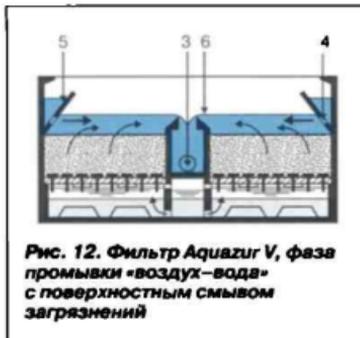


Рис. 12. Фильтр *Aquazur V*, фаза промывки «воздух–вода» с поверхностным смывом загрязнений

3.1.1.2. Преимущества фильтра **Aquazur V**

В фильтре **Aquazur V** объединены все принципы фильтрации, которые характеризуют хорошую фильтрацию и эффективную промывку

- он максимально приспособлен для повышенных скоростей фильтрации, при которых можно использовать высоту слоя загрузки от 1 до 2 м,
- в нем сохраняется нормальное положительное давление на всей высоте песчаной загрузки и в течение всего цикла фильтрации,
- способ его промывки без расширения фильтрующего слоя позволяет избежать любой гидравлической классификации материалов фильтрующего слоя, который остается однородным даже при использовании материалов с высоким значением коэффициента однородности (например, $\approx 1,7$ — см гл 5, п 7.1.1);
- расход возвращаемой для промывки фильтрованной воды небольшой, что сокращает размер оборудования и потребление энергии,
- гидравлическое устройство оптимизировано по примеру переливов промывной воды, профиль которых позволяет избежать выноса фильтрующей загрузки,
- промывка возвращаемой фильтрованной водой в течение всего периода продувки воздухом сочетается со смывом вынесенных на поверхность слоя загрузки загрязнений. Потребление промывной воды колеблется обычно в интервале от 1 до 3 % объема фильтра в зависимости от качества обрабатываемой воды и ее температуры,
- исходная вода продолжает поступать на фильтр полностью или частично во время всей промывки, тем самым обеспечивая смыв загрязнений с поверхности

слоя загрузки, в результате для других фильтров той же батареи не происходит в течение этого времени резкого увеличения расхода и, следовательно, отсутствуют скачки скорости фильтрации.

— возвращение к режиму фильтрации осуществляется путем простого подъема уровня воды, что приводит к постепенному запуску фильтра после промывки независимо от типа используемого регулирующего устройства. Такой запуск может, при желании, растягиваться на период до 15 мин

3.1.1.3. Стандартные размеры

Стандартизированные площади фильтрования однокамерных фильтров **Aquazur V** варьируются от 24,5 до 105 м². В варианте двухкамерных фильтров площади достигают 49–210 м²

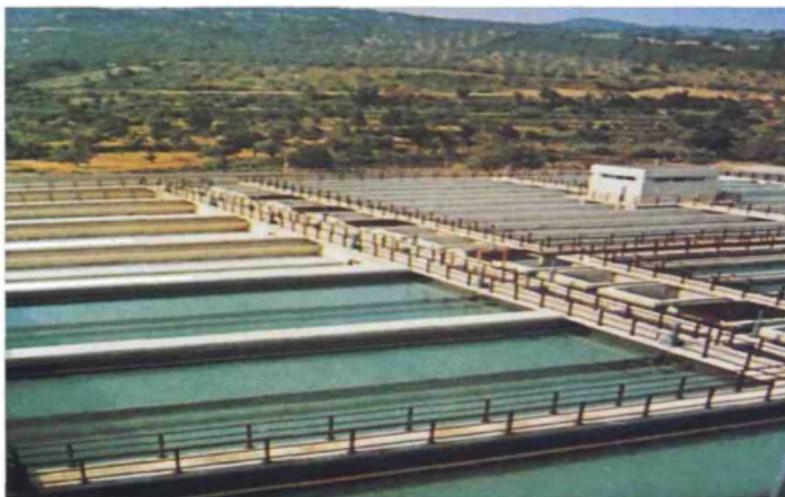


Фото 5. Станция в Пертусилло (Италия). Расход 16 200 м³/ч. Батарея из 14 двойных фильтров Aquazur V

На фото 2 представлен фильтр **Aquazur V** в процессе строительства, там хорошо видны:

- несущий пол из бетонных плит с дренажными колпачками,
- V-образный боковой канал подачи смывающей воды;
- желоб отвода промывных вод

3.1.2. Высокоскоростные фильтры Aquazur

Фильтры **Aquazur V** могут работать со скоростями, превышающими 20 м/ч, но тогда к ним необходимо адаптировать конструкцию фильтра, фильтры **Aquazur V** на водопроводной станции -Prospect- в Сиднее (Австралия) являются тому примером



Заказчик: Сиднейская водная корпорация (Sydney Water Corporation)

Тип воды: вода из водохранилища перед плотиной

Производительность (по обработанной воде) 125 000 м³/ч

Применение: прямая фильтрация

Фильтрующая батарея. 24 двойных фильтра Aquazur V

Единичная площадь фильтра 238 м²

Общая площадь фильтрации. 5710 м²

Фильтрующий материал: песок с эффективным размером 1,8 мм.

Фото 6. Aquazur V, Сидней (Австралия). Расход 3 000 000 м³/сут

Основные параметры фильтрации и промывок были определены во время предварительных пилотных испытаний (см. также гл. 3, п. 5.4.5.1):

- кондиционирование хлорным железом, органическим коагулянтом (катионный полимер) и флокулянтом (анионный полимер);
- фильтрующая загрузка. 2,15 м песка (эффективный размер частиц 1,8 мм);
- максимальная скорость фильтрации. 24 м³/(ч · м²);
- условия промывки:
 - промывка одновременно воздухом и водой. расход воздуха — 70 м³/(ч · м²); расход воды — 30 м³/(ч · м²);
 - расход отмывки только водой 60 м³/(ч · м²) с дополнительным расходом воды на поверхностный смыв 7 м³/(ч · м²).

Чтобы обеспечить достаточное давление в фильтрующем слое, учитывая примененную скорость, высота воды над песком увеличена до 2 м.

Скорости основной промывки и окончательной отмывки существенно превосходят обычные скорости из-за реагентов, вводимых перед фильтрацией. Чтобы уменьшить размеры промывного оборудования, камеры промываются последовательно, в отличие от стандартного фильтра Aquazur V, обе камеры которого промываются одновременно.

3.1.3. Фильтры Aquazur T

Они характеризуются небольшой высотой слоя воды (50 см над песком), недостаточной для того, чтобы гарантировать положительное давление во всех точках загрузки и в течение всего цикла фильтрации, следовательно, существует риск дегазации, который нужно ограничивать следующими мерами:

- фильтрующий слой должен иметь однородный гранулометрический состав и высоту обычно в интервале 0,8–1 м,
- размер гранул фильтрующей загрузки должен находиться в интервале 0,7–1,35 мм,
- необходимо обеспечить сокращенный высотный перепад (в целом 1,5–2 м), что позволяет избежать серьезной дегазации в результате слишком сильного загрязнения фильтра

В зависимости от происхождения вод и их способности к дегазации максимальная скорость фильтрации может быть от 5 до 10 м/ч

В фильтрах **Aquazur T** с маленькой площадью фильтрации воздух под несущим полом распределяется с помощью коллектора подачи воздуха с патрубками (рис. 13)

В фильтрах большего размера воздух распределяется бетонным каналом, расположенным под одним из желобов отвода промывных вод (рис. 14)

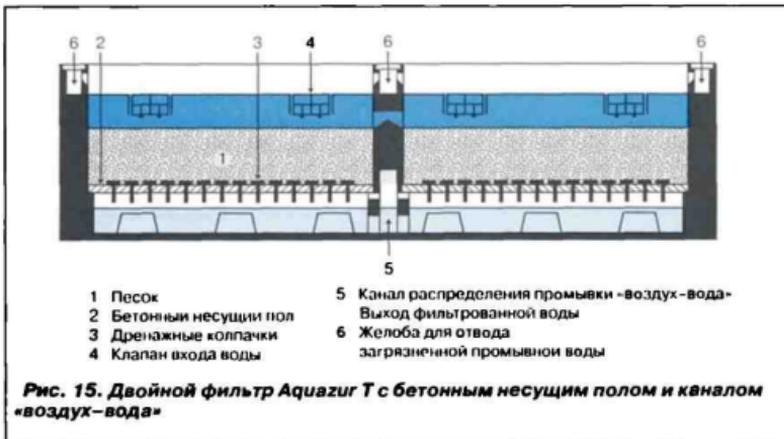


В обоих случаях этот воздух распределяется равномерно по всей площади фильтра благодаря формированию воздушной подушки и с помощью длиннотрубчатых дренажных колпачков

Фильтры **Aquazur T** снабжены тремя главными задвижками и/или вентилями соответственно на фильтрованную воду, промывной воде и промывном воздухе

Подвод исходной воды управляется задвижкой, которая закрывается автоматически во время промывки, когда уровень воды в фильтре становится выше, чем уровень в подводящем канале.

Отвод промывных вод осуществляется переливом в продольные желоба. Уровень воды в этих фильтрах регулируется либо специальным сифоном, либо дисковым затвором, управляемым с помощью регулятора. Небольшая высота воды над песком (0,50 м) является важным преимуществом с точки зрения эксплуатации фильтра: это позволяет очень быстро осуществлять водную промывку, так как выделенные загрязнения, которые нужно удалить, не разбавлены в большом объеме воды. В результате одновременно получают экономии времени и промывной воды. Фильтры могут быть как простыми, так и двойными. В последнем случае две фильтрующие камеры сообщаются друг с другом сверху и снизу и имеют один регулятор (рис. 15).



3.1.3.1. Промывка фильтров Aquazug T

Промывка осуществляется в следующей последовательности.

- создание воздушной подушки.
- промывка воздухом и водой от 5 до 10 мин,
- отмывка только водой с большим расходом, до тех пор пока отводимая промывная вода не станет чистой.

Расходы для промывки

- воды при основной промывке $5-7 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$,
- воздуха при основной промывке $50-60 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$,
- воды при отмывке $20 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$

Промывка длится приблизительно 10 мин. Потребление промывной воды зависит главным образом от качества исходной воды и варьируется обычно в интервале 1-2 % объема фильтрата.

3.1.3.2. Стандартные размеры

Единичная площадь фильтрования однокамерного фильтра Aquazug T составляет от $6,5$ до 70 м^2 , двухкамерного — от 49 до 140 м^2 .

3.2. Двухслойные фильтры Médiazur

Фильтры Médiazur заполнены двумя слоями разных материалов (например, песок и антрацит), они характеризуются большой высотой слоя воды и скоростью фильтрации в интервале от 7 до 20 м/ч. Двухслойные фильтры обычно промываются сначала воздухом, потом водой, промывка одновременно воздухом и водой возможна при условии адаптации к ней конструкции фильтров. Промывка фильтра Médiazur В осуществляется без поверхностного смыва загрязнений, промывка фильтра Médiazur BV — с поверхностным смывом загрязнений.

Их конструкция идентична конструкции фильтров Aquazur V, за исключением способов промывки и подачи исходной воды.

Фильтры Médiazur В и BV имеют следующие общие характеристики:

- большая высота слоя воды над фильтрующим слоем, равная как минимум 1 м и в большинстве случаев — 1,20 м,
- общая высота фильтрующей загрузки находится обычно в интервале от 0,9 до 1,6 м,
- одна или несколько задвижек или диафрагменных затворов, предназначенных для полного прекращения подачи исходной воды во время фаз опорожнения и промывки водой и воздухом. В фильтрах Médiazur BV подача исходной воды прекращается лишь частично в течение фазы промывки только водой, чтобы ограничить скорость поверхностного смыва загрязнений,
- значительный расход возвращаемой для промывки воды, который зависит от материала фильтрующей загрузки, поскольку он должен обеспечить ее разжижение и тем самым восстановить ее распределение.

Промывка обычно осуществляется в следующей последовательности (воздух, потом вода):

- опорожнение до уровня фильтрующей загрузки,
- создание воздушной подушки;
- продувка только воздухом с расходом $55\text{--}70 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$;
- спуск воздушной подушки,
- промывка только водой с большой скоростью, чтобы расширить фильтрующий слой, удалить загрязнения, рассеянные по всей его высоте продувкой воздухом, и восстановить распределение материала загрузки. В фильтрах Médiazur BV эта фаза промывки сопровождается новым поступлением исходной воды через соответствующие каналы для поверхностного смыва загрязнений, ускоряя тем самым их удаление.

Фильтры Médiazur В, с учетом ширины слоя фильтрующей загрузки и скорости промывки, должны быть оборудованы несколькими поперечными жлобами, чтобы избежать излишне высокой скорости на гребне переливов и выноса загрузки в канализацию во время фазы скоростной промывки водой.

Промывка фильтров Médiazur BV может включать в себя фазу промывки одновременно воздухом и водой благодаря изменению их конструкции. Тогда промывка выполняется в следующей последовательности:

- опорожнение до уровня фильтрующей загрузки,
- создание воздушной подушки;
- промывка с одновременной подачей воздуха с расходом $55\text{--}70 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$ и воды с расходом $7\text{--}15 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$, которая прекращается, прежде чем вода достигнет уровня перелива (промывка без переполнения),
- спуск воздушной подушки, затем скоростная промывка только водой без поверхностного смыва, чтобы расширить фильтрующий слой загрузки и удалить воздух до момента перелива воды,

— скоростная отмывка только водой, чтобы сохранить расширение фильтрующего слоя загрузки, восстановить распределение материала загрузки и благодаря поверхностному смыву водой расходом $5-7 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$ ускорить отвод загрязнений

Ввиду ограниченного времени фазы промывки воздухом и водой эти пять последовательных процедур повторяются от одного до трех раз

3.3. Фильтры Carbazur с активированным углем

Фильтры Carbazur разработаны для обработки вод с использованием гранулированного активированного угля (ГАУ), они могут быть также приспособлены к работе с другими легкими фильтрующими материалами (пемза, антрацит и т. д.)

Различают

- фильтр Carbazur G с низким уровнем воды и скоростью фильтрации от 5 до 10 м/ч,
- фильтры Carbazur V и GH с высоким уровнем воды и скоростью фильтрации от 7 до 20 м/ч,
- фильтр Carbazur DF с двойным потоком, высоким уровнем воды и скоростью фильтрации от 5 до 15 м/ч. Он состоит из двух ячеек фильтрации, в которые вода подается последовательно. Carbazur DF — это фильтр, специально разработанный для использования на стадии вторичной фильтрации через ГАУ

3.3.1. Фильтр Carbazur G

Фильтр Carbazur G используется для фильтрации относительно слабо загрязненных вод, поскольку на таких водах потеря напора будет еще невелика (менее 50 см вод. ст.)

Обычно применяется мелкий фильтрующий материал с эффективным размером зерен примерно 0,55 мм. Чтобы избежать выноса частиц загрузки, необходимо собирать промывные воды на большой длине, что достигается размещением в фильтре нескольких поперечных лотков

Имея такую же конструкцию, как и фильтры Aquazur T, фильтр Carbazur G отличается от них условиями промывки и подачей воды на фильтрацию

Последовательность промывки

- понижение уровня воды до уровня фильтрующей загрузки,
 - создание воздушной подушки,
 - продувка только воздухом с расходом $55-70 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$,
 - сброс воздушной подушки,
 - промывка только водой до тех пор, пока отводимая промывная вода не станет прозрачной. Такая промывка обеспечивает восстановление распределения гранул загрузки, что важно для оптимального использования активированного угля
- Устройство подачи воды на фильтрацию снабжено задвижками или диафрагменными затворами

3.3.2. Фильтры Carbazur V и GH

Фильтры Carbazur V и GH работают со скоростями фильтрации от 7 до 20 м/ч, их конструкция идентична конструкции фильтров Aquazur V за исключением способа промывки и подачи исходной воды

Фильтр Carbazur V используется на первой ступени фильтрации, тогда как Carbazur GH — на второй ступени. Эффективный размер зерен ГАУ составляет примерно 0,95 мм для Carbazur V и 0,7 мм для Carbazur GH

Фильтры **Carbazur V** и **GH** имеют следующие общие характеристики:

- высокий слой воды над фильтрующей загрузкой, равный как минимум 1 м, а в большинстве случаев — 1,20 м;
- высота слоя ГАУ составляет обычно от 1,2 до 2 м;
- одна или несколько задвижек или диафрагменных затворов, позволяющих полностью прекращать поступление исходной воды во время фаз опорожнения и промывки воздухом;
- значительный расход возвращаемой на промывку воды, который зависит от материала загрузки, поскольку он должен поддерживать ее расширение в период промывки

Последовательность промывки.

- понижение уровня воды до уровня фильтрующей загрузки;
- создание воздушной подушки;
- продувка только воздухом с расходом $55-70 \text{ м}^3/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$;
- спуск воздушной подушки;
- скоростная промывка только водой с большой скоростью, для того чтобы расширить фильтрующий слой загрузки, удалить загрязнения, рассеянные по всей его высоте продувкой воздухом, и восстановить распределение загрузки.

Фильтр **Carbazur GH** с учетом ширины фильтрующего слоя и скорости промывки должен быть оборудован несколькими поперечными желобами, чтобы избежать выноса ГАУ во время спада промывки только водой.

3.3.3. Фильтр Carbazur DF

Фильтр **Carbazur DF** (с двойным потоком) используется на стадии вторичной фильтрации. Он состоит из двух ячеек, объединенных в единую конструкцию (рис. 16)

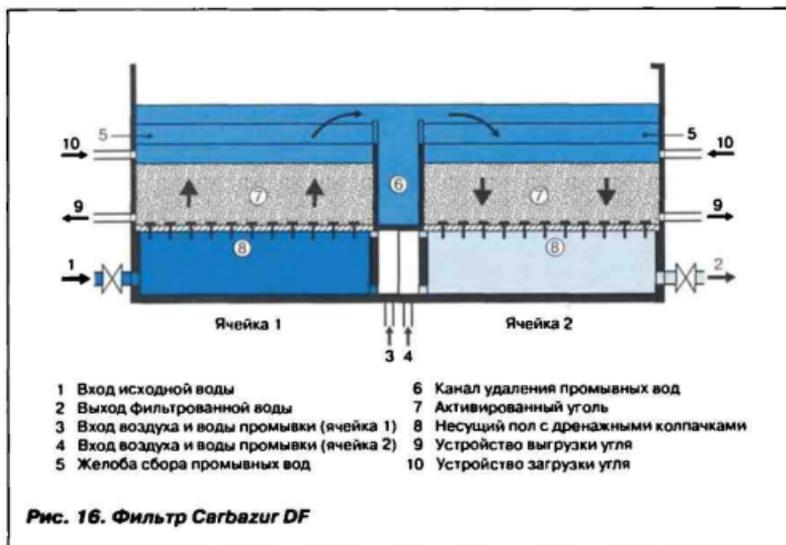


Рис. 16. Фильтр Carbazur DF

Каждая ячейка содержит несущий пол с дренажными колпачками и слой активированного угля.

Обрабатываемая вода проходит через ячейку 1 восходящим потоком, а затем через ячейку 2 нисходящим потоком

Обе ячейки промываются воздухом, потом водой согласно процедуре, идентичной процедуре промывки фильтров **Carbazur G**. Каждая ячейка оборудована поперечными желобами для сбора промывных вод, которые затем переливаются в главный канал отвода промывных вод.

В начале работы фильтра обе ячейки загружены свежим ГАУ. Когда ГАУ в ячейке 1 оказывается насыщенным, он извлекается и направляется на регенерацию. Затем ГАУ из ячейки 2 перегружается в ячейку 1. И наконец, ячейка 2 заполняется либо новым, либо регенерированным ГАУ.

Все эти манипуляции осуществляются с помощью устройств выгрузки и загрузки ГАУ, которыми снабжена каждая ячейка фильтра.

Принятая концепция фильтра с двумя ячейками обеспечивает «противоточный контакт» воды с ГАУ, что способствует оптимальному использованию активированного угля, действительно, ГАУ, отправляемый на регенерацию, — это уголь, который полностью насыщен, поскольку качество фильтрованной воды обеспечивается в конечном итоге активированным углем в ячейке 2 (к моменту перегрузки он оказывается менее насыщенным загрязняющими веществами). Кроме того, если такой фильтр используется после озонирования, прохождение воды через ГАУ в ячейке 1 приводит к разрушению остаточного озона, в результате атмосфера над ячейками фильтрации освобождается от остаточного озона, благодаря чему упрощается конструкция покрытия фильтра.

4. Особые фильтры

4.1. Фильтры Filtrazur

Их особенностью заключается в использовании **фильтрующего материала с плотностью, гораздо меньшей плотности воды**, что вызывает необходимость принятия особых технологических решений, касающихся

- общей гидравлики: исходная вода проходит через фильтрующую загрузку снизу вверх, при этом сверху загрузка удерживается плитой перекрытия с дренажными колпачками;
 - способа промывки: разжижение нисходящим потоком промывной воды.
- Фильтры **Filtrazur** (рис. 17) характеризуются
- фильтрующей загрузкой материалом **Mediaflo**, который представляет собой пенополистирол с кажущейся плотностью от 40 до 60 кг/м³,
 - высотой слоя фильтрующей загрузки в интервале от 1 до 1,5 м,
 - эффективным размером частиц фильтрующего материала, близким к 1,1 мм (интервал 0,55–1,7 мм), и очень низким коэффициентом однородности, порядка 1,2–1,3;
 - подачей исходной воды через закрытый канал, расположенный непосредственно под днищем фильтра, и отводом фильтра через плиту перекрытия с дренажными колпачками и последующий перелив,
 - резервом промывной воды (обычно 80 см) над плитой перекрытия с дренажными колпачками и высотой воды под слоем фильтрующей загрузки порядка 1,5 м, чтобы создать возможность его расширения в процессе промывки;

— противоточной промывкой с расширением слоя фильтрующей загрузки, при этом вода проходит сверху вниз в режиме быстрого опорожнения фильтра с расходом примерно $70 \text{ м}^3/(\text{ч м}^2)$ в зависимости от гранулометрии материала **Médiaflo**. Дополнительная промывка обеспечивается струями воды с расходом от 7 до $25 \text{ м}^3/(\text{ч м}^2)$, которые создаются колебаниями встряхивающей решетки.

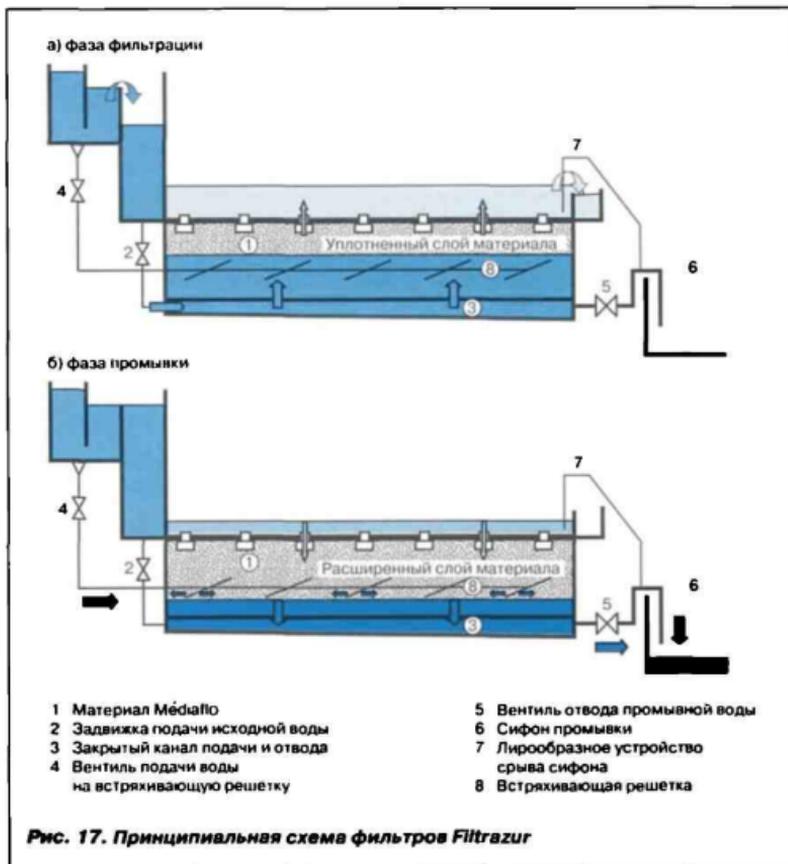


Рис. 17. Принципиальная схема фильтров Filtrazur

Фильтры **Filtrazur** могут быть металлическими (обычно круглого сечения) или выполненными из бетона (обычно прямоугольного сечения).

Они могут быть построены в виде батарей фильтров, снабжаемых через общий канал, при этом равнопоточное распределение обеспечивается переливами и колдочками. Как вариант, вода в них может поступать путем перекачивания через

встряивающие решетки, потеря напора на которых подлежит в таком случае расчету для обеспечения достаточно равномерного распределения воды между фильтрами. В обоих случаях фильтры **Filtrazur** не нуждаются в каком-либо механизме регулирования.

4.1.1. Промывка фильтров **Filtrazur**

Промывка осуществляется в следующей последовательности (см. рис. 17, б)

- закрытие задвижки подачи исходной воды (2), которая в таком случае направляется к встряхивающей решетке (9) в результате открытия вентиля (4),
- частичное опорожнение фильтра путем открытия вентиля отвода промывной воды (5), вода проходит по контуру отвода промывных вод, который содержит закрытый канал подачи и отвода (3), регулируемый вентиль (5) и сифон (6), расход отводимой промывной воды устанавливается таким, чтобы скорость воды внутри фильтрующей загрузки вызвала его расширение,
- остановка промывки фильтра срывом сифона [воздух входит в лиру сифона (7), когда его отверстие оказывается выше уровня воды],
- промывка потоком исходной водой через встряхивающую решетку,
- заполнение фильтра: закрытие контура отвода промывных вод и контура подачи воды на встряхивающую решетку с возобновлением подачи исходной воды через канал (3)

Учитывая время работы задвижки и вентиля, промывка длится 10–20 мин и заканчивается заполнением фильтра исходной водой до его нормального уровня в режиме фильтрации.

4.1.2. Преимущества фильтра **Filtrazur**

В фильтре **Filtrazur** объединены все принципы, которые характеризуют хорошую фильтрацию и эффективную промывку

- исходная вода течет в направлении прижимания фильтрующей загрузки к плите перекрытия, как и в песчаном фильтре, что обеспечивает качество фильтрации, идентичное тому, что достигается в фильтре с песком той же гранулометрии,
- исходная вода продолжает поступать в фильтр через встряхивающую решетку в полном объеме в течение всего периода промывки, в результате для других фильтров той же батареи не происходит в это время резкого увеличения расхода и, следовательно, нет увеличения скорости фильтрации,
- хорошая приспособленность к работе с высокими скоростями фильтрации — от 7 до 25 м³/(ч · м²), так как его фильтрующая загрузка не подвергается опасности расширения в ходе цикла фильтрации,
- очень узкий интервал гранулометрии фильтрующего материала **Medialfo** (коэффициент однородности порядка 1,25) снижает риск его гидравлической классификации в процессе промывки;
- отсутствие оборудования с вращающимися элементами (нет ни насоса подачи промывной воды, ни воздухоподжиги) обеспечивает простоту эксплуатации и обслуживания, а потребление энергии на промывки очень незначительно,
- потребление промывной воды близко к ее потреблению фильтрами **Aquazur V** и варьируется обычно в пределах 1–3 % объема фильтрата в зависимости от качества обрабатываемой воды.

К тому же, если состояние поверхности фильтрующего материала **Medialfo** благоприятно для закрепления на нем нитрифицирующих бактерий, фильтр **Filtrazur** может обеспечить дополнительное устранение аммония в пределах присутствия в

обрабатываемой воде растворенного кислорода и без дополнительной непрерывной аэрации

4.1.3. Стандартные размеры

- Вариант металлической конструкции диаметр от 0,95 до 3,5 м
- Вариант конструкции из бетона площадь от 30 до 75 м²



Фото 7. Установка «Flins Aubergenville» (Франция). Расход 1500 м³/ч, 5 фильтров Filtrazur площадью по 42 м²

4.2. Фильтры Greenleaf

В фильтре **Greenleaf** осуществляется оригинальный способ контроля фильтрации и промывки. Для промывки этого гравитационного фильтра используется фильтрованная на нем же вода, и он нуждается в дополнительной промывной воде лишь в том случае, если расход фильтрата оказывается недостаточным. Промывка может осуществляться только водой с расходом 35–50 м³/(ч м²), одновременно воздухом с расходом 30–55 м³/(ч м²) и водой с расходом 24–60 м³/(ч м²) или, наконец, сначала воздухом с расходом 30–70 м³/(ч м²) и потом водой с расходом 35–50 м³/(ч м²).

Главный элемент системы **Greenleaf** — это устройство распределения и центрального контроля, управляющее четырьмя камерами. Последние могут быть круглыми (сталь или бетон), квадратными или прямоугольными (бетон).

4.2.1. Фильтрация

Исходная вода (рис. 18) поступает в центральную зону по кольцевому распределительному желобу (1).

Входной сифон (2) каждой камеры питает исходной водой входной канал (3), снабженный переливом равномерного распределения (4). Эти входные переливы с постоянным уровнем заменяют регуляторы расхода.

Фильтрат собирается в канале (5), общем для всех фильтрующих камер, и выходит из него через перелив (6), который поддерживает постоянной нагрузку воды на фильтрующую загрузку (12)

4.2.2. Промывка

Промывка начинается при достижении максимального уровня воды в одной камере фильтрации: входной сифон (2) фильтрующей камеры срывается открытием вентиля (7) Уровень воды понижается в этом случае до уровня перелива (6). Другие камеры по-прежнему функционируют.

При закрытии вентиля (8) сифон промывки (9) связывается с вакуумной камерой (10) В результате вода поднимается одновременно из резервуара отведения промывных вод и из центральной колонны фильтра и поступает в сифон вплоть до его запуска

Промывная вода, поступающая из главного резервуара фильтрата, проходит противотоком через фильтрующую загрузку, собирается желобом (11), проходит через сифон (9), потом удаляется опорожнением (13).

Когда фильтр промыт, сифон (9) срывается открытием вентиля (8). Возвращение к режиму фильтрации происходит тогда закрытием вентиля (7) и возобновлением работы входного сифона (2)

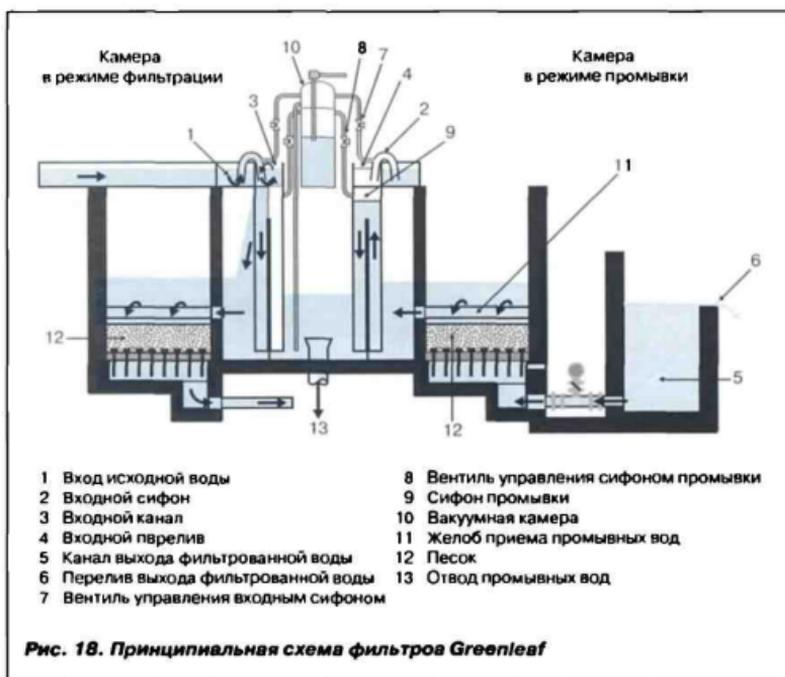


Рис. 18. Принципиальная схема фильтров Greenleaf

4.3. Фильтры ABW

Фильтры **ABW** (Automatic BackWash) (рис. 19 и фото 8) — это песчаные фильтры с автоматической посекционной промывкой (см. гл. 3, п. 5); они используются в производстве питьевых или технологических вод и особенно при третичной обработке городских или промышленных сточных вод.

Концепция фильтра **ABW** основана на очень неглубоком проникновении флоккул взвеси в фильтрующий слой (загрязнение ограничено первыми 5–10 см фильтрующей загрузки) при нормальных условиях работы (мелкая загрузка, короткий цикл), что приводит к небольшим потерям напора (15–25 см вод. ст.) Это является важным преимуществом при модернизации существующих сооружений, поскольку фильтры данного типа часто могут входить в технологическую линию без изменения высотной схемы сооружений, т. е. без дополнительного перекачивания обрабатываемой воды (в результате обеспечивается снижение энергетических затрат и риска разрушения флоккул).

Чтобы поддерживать небольшую потерю напора, фильтр **ABW** промывается автоматически и относительно часто. Слой фильтрующей загрузки фильтра **ABW** разделен на секции; автоматическое устройство промывает последовательно каждую секцию, в то время как другие продолжают работать.

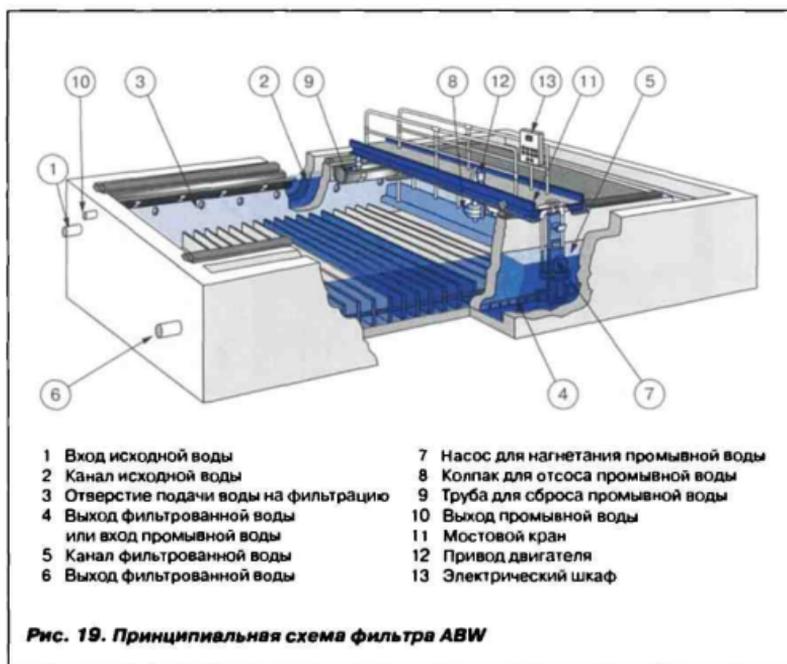




Фото 8. Фильтр АВУ

4.3.1. Фильтрация

Скорость фильтрации варьируется обычно от 5 до 7,5 м/ч. Промывка начинается, когда потеря напора превосходит на 5–15 см вод. ст. свое значение в чистом слое загрузки.

Фильтрующий и несущий полы разделены на секции. Фильтрующая загрузка обычно представляет собой слой песка высотой 30 см, поддерживаемый специально проработанными пористыми плитами из полиэтилена или керамики.

В производстве питьевой воды можно использовать слой из песка высотой до 60 см, или двухслойную загрузку песок/антрацит высотой от 40 до 60 см, или слой активированного угля высотой до 120 см.

Во время фильтрации вода из подающего канала входит через отверстия над фильтрующим слоем, потом проходит через фильтрующую загрузку и поддерживающую плиту и поступает в канал для фильтрованной воды через отверстия под каждой секцией.

4.3.2. Промывка

Устройство промывки запускается при достижении заранее определенной потери напора или после некоторого периода работы фильтра в режиме фильтрации. Начатая один раз, промывка выполняется от одного края фильтра до другого, причем все секции, кроме промываемой, продолжают работать. Автоматическое устройство обратной промывки, подвешенное на механическом мостовом кране, всасывает воду из канала обработанной воды и подает ее под несущий пол промываемой секции. Промываемая вода расширяет фильтрующий слой загрузки до его разжижения, освобождая тем самым задержанные частицы загрязнений.

Эти частицы отсасываются устройством и насосом, подвешенными на мостовом кране, и потом сбрасываются в канал грязных промывных вод. Мостовой кран перемещается вдоль фильтра, промывая последовательно каждую секцию до тех пор, пока не пройдет их все и потеря напора не достигнет своего нормального значения. Так как канал обработанной воды содержит достаточное количество воды для питания насоса обратной промывки, нет необходимости в размещении накопителя чис-

той промывной воды. Как только мостовой кран достигает края фильтра, он останавливается, и насосы прекращают работу до тех пор, пока потеря напора снова не достигнет заранее установленного значения

Промывка обычно не продолжается до достижения максимальной чистоты загрузки. Цикл очистки короткий, но повторяется регулярно (обычно в течение 30 с каждые 2–6 ч), поддерживает фильтрующую загрузку в достаточно чистом состоянии и ограничивает проникновение в нее загрязняющих частиц на глубину больше 5,0–7,5 см от верхнего слоя. Присутствие остаточных загрязняющих веществ в верхней части слоя загрузки является преимуществом, поскольку улучшает задержание взвешенных частиц во время фильтрации

4.4. Самопромывающиеся фильтры без задвижки

Эти фильтры работают в абсолютно автономном и автоматическом режиме как во время фильтрации, так и во время промывки. Исходная вода поступает из подающего бака и после фильтрации через слой загрузки малого гранулометрического состава снова поднимается к расположенному наверху накопителю фильтрата. Как только накопитель заполняется, вода через перелив поступает на использование

Когда фильтрующий слой загрязняется, уровень исходной воды поднимается до подающего бака и в верхнюю ветвь сифона. При достижении максимальной потери напора сжатый воздух, содержащийся в сифоне, вырывается наружу, и сифон приводится в действие. Запас фильтрованной воды проходит противотоком через фильтр, чтобы тем самым обеспечить его промывку

Фильтры этой конструкции защищены от слишком сильной загрязненности, так как промывка осуществляется автоматически по фиксированному и отрегулированному значению потери напора

Самопромывающиеся фильтры без задвижки применяются, в частности, когда отсутствуют источники сжатого воздуха и электричества. Они подходят для вод с малой или средней степенью загрязненности взвешенными веществами и когда сеть распределения воды допускает остановку на время восстановления необходимого объема промывной воды

Ввиду того что загрузка мелкозернистая (эффективный номинальный размер зерен 0,55 или 0,65 мм), а также вследствие малой высоты ее слоя, способность задерживания загрязнений довольно мала, а скорости фильтрации составляют обычно от 5 до 7,5 м/ч и не превышают 10 м/ч

Фильтры данного типа используются

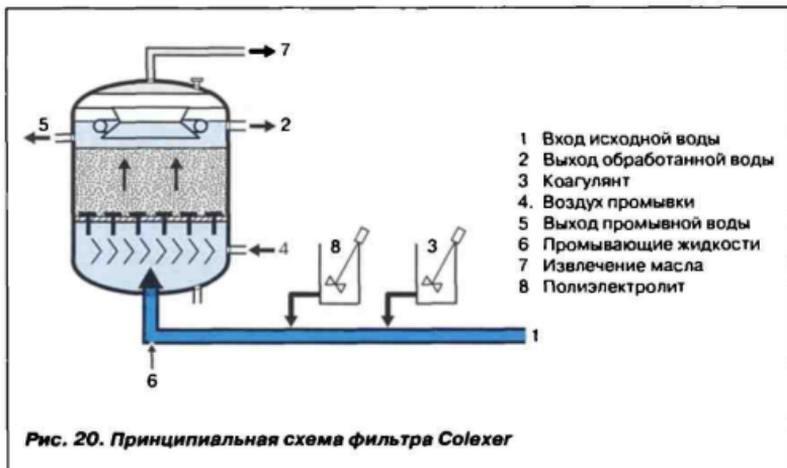
- для прямой фильтрации без коагулянта и флокулянта (кроме особых случаев) и для обработки вод с низкой забивающей способностью (полукрытые системы охлаждения),

- для фильтрации предварительно отстаиваемых вод

Такие фильтры имеют в диаметре от 1,6 до 4 м

4.5. Фильтры Colorex с восходящим потоком для извлечения масел

В фильтре Colorex (рис. 20) мелкие капельки углеводородов (1–20 мкм) в водной суспензии задерживаются фильтрующей загрузкой согласно тем же механизмам, что и взвешенные вещества (см. гл. 3, п. 5), и подливают пленку углеводородов, которая постепенно смещается к верхней части слоя загрузки, откуда они выходят уже в виде более крупных капель размером от 0,2 до 2 мм. Твердые частицы также



задерживаются и накапливаются в загрузке, но их аккумулярование нарушает понемногу механизм коалесценции, и, следовательно, фильтр должен регулярно промываться, кроме того, величина скорости восходящего потока не должна приводить к внезапному разжижению загрузки с выносом задержанных загрязнений. В этом случае при промывке должны удаляться загрязнения по всей высоте загрузки.

Фильтры **Colexer** дают наилучшие результаты в трех областях.

- извлечение масел из конденсатов (в таком случае процесс коалесценции масла должен быть преобладающим) с непрерывным сбором масла,
- извлечение масел из так называемых вод нефтяных месторождений (в этом случае процесс фильтрации может быть относительно более важным, чем коалесценция, за исключением случаев, когда отношение концентрации углеводородов к концентрации ВВ превышает 5).
- рекуперация органического растворителя в некоторых гидрометаллургических процессах, включающих стадию экстракции с помощью растворителя

5. Контроль за работой фильтров и их регулирование

Фильтрующая батарея может состоять из нескольких фильтров, исходную воду на которые нужно подавать равномерно, избегая, в частности, перелива на любом из фильтров. Эта проблема требует особого внимания, когда батарея состоит только из двух или трех фильтров.

В батареях напорных фильтров особенно важно давление исходной воды, а способы регулирования достаточно просты: это диафрагма, в случае необходимости — регулирующий вентиль.

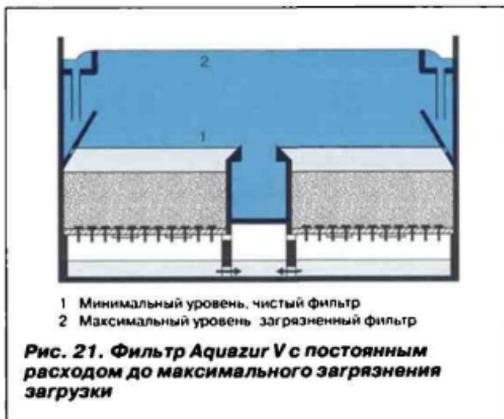
Открытые фильтры характеризуются тремя главными режимами гидравлического функционирования:

- с постоянным расходом до максимального загрязнения загрузки;

- с постоянным расходом, с регулятором, автоматически компенсирующим забивание загрузки,
- с изменяющимся расходом (или с убывающим потоком)

5.1. Фильтры с постоянным расходом до максимального загрязнения загрузки

Так называются фильтры с постоянным расходом фильтрата и с изменяющимся уровнем воды в фильтре (рис 21)



Равномерное распределение полного потока исходной воды осуществляется на входе фильтров, где вода переливается с высоты, изменяющейся в зависимости от степени забивания загрузки. Когда фильтр чист, песок лишь немного покрыт водой, уровень которой (1) поддерживается за счет высоты перелива отвода фильтрованной воды. При максимальном загрязнении загрузки уровень воды достигает высотной отметки плоскости подаваемой исходной воды (уровень 2)

Обычно повышение уровня 2 составляет от 1,5 до 2 м в зависимости от granulометрии фильтрующей массы. Эти фильтры наиболее просты, но отличаются риском повреждения флоккул загрязнений, что может повлиять на качество фильтрата.

Эти фильтры наиболее просты, но отличаются риском повреждения флоккул загрязнений, что может повлиять на качество фильтрата.

5.2. Фильтры с постоянным расходом и компенсацией забивания загрузки

Для нормальной работы фильтров этого типа необходимо одновременно выполнить два условия: уровень воды в фильтрах должен быть постоянным или мало изменяться, и поток фильтрованной воды, отводимой на 2–3 м ниже, должен быть постоянным или равным общему входящему расходу исходной воды, разделенному на число фильтров.

Поддержание постоянного расхода фильтрата, какой бы ни была степень загрязнения загрузки фильтров, обеспечивается регулятором, расположенным на выходе из каждого из них, который действует либо как регулятор расхода фильтрата, либо как регулятор уровня исходной воды с предварительным сохранением равнопоточного распределения. Это устройство создает дополнительную потерю напора, которая существует, когда фильтр чист, и отсутствует, когда фильтр полностью загрязнен, таким образом, регулятор компенсирует забивание фильтрующего слоя.

По сравнению с фильтрами с постоянным расходом фильтрата до загрязнения фильтры с компенсацией забивания загрузки предпочтительнее с точки зрения стабильности качества обрабатываемой воды и надежности эксплуатации даже в случае быстро изменяющейся подачи исходной воды

5.2.1. Регулирование батареи фильтров

Обычно используются два типа регулирования с измерением расхода фильтрата и с поддержанием постоянного уровня исходной воды

5.2.1.1. Регулирование с измерением расхода фильтрата

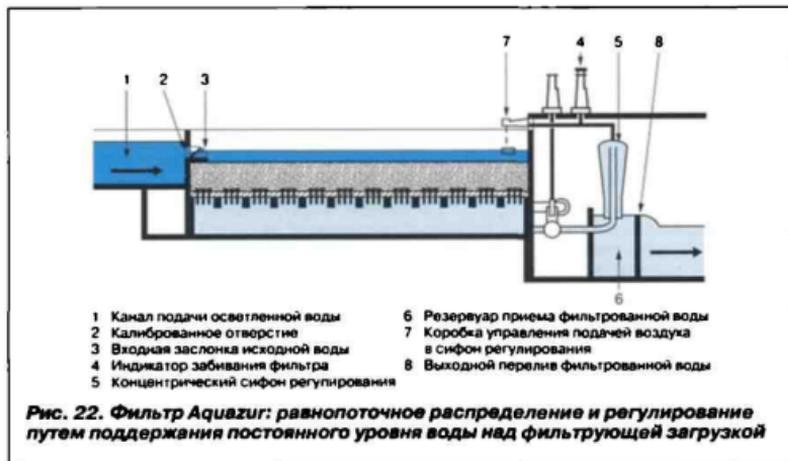
Каждый фильтр оснащен расходомером и устройством регулирования отвода фильтрата (дисковый затвор, диафрагменный вентиль, сифон), расположенными на выходе фильтра. Регулятор получает сигнал расходомера и воздействует на устройство регулирования, чтобы привести расход к предписанному значению

Неизбежные расхождения между суммой установленных расходов в фильтрах и предписанным общим расходом фильтрата от всей батареи фильтров проявляются в изменении уровня воды в фильтрах. Эти уровни корректируются дополнительным регулированием путем изменения предписанного расхода каждого фильтра в зависимости от измерения уровня до батареи фильтров, если предписанный расход является расходом входящей исходной воды, и измерения уровня после нее, если предписанный расход является расходом исходящего фильтрата.

В обоих случаях колебание уровня воды в подводящем канале и фильтрах может достигать 30 см

5.2.1.2. Регулирование с поддержанием постоянного уровня исходной воды

Чтобы расход фильтрата каждого фильтра был постоянным, можно воспользоваться критерием постоянства уровня воды. В этом случае сначала осуществляют равномерное распределение потока исходной воды между фильтрами, устройство регулирова-



ния в каждом из которых работает по взятой в качестве критерия сравнения постоянной высотной отметке уровня воды до или, возможно, после фильтрующей загрузки

При регулировании по высотной отметке уровня над слоем фильтрующей загрузки (рис. 22) входящий на сооружение поток исходной воды сначала равномерно распределяется между всеми фильтрами, которые получают, таким образом, расход воды, равный входящему потоку, разделенному на число фильтров

Каждый фильтр оснащен регулирующим устройством, измеряющим уровень воды над загрузкой, который он поддерживает постоянным, воздействуя на устройство регулирования расхода воды на выходе фильтра. Благодаря этому расход воды на выходе фильтра равен расходу воды на входе в фильтр, и, таким образом, компенсируется забивание загрузки

В этом способе регулирования с поддержанием постоянного уровня равномерное распределение входящего потока обеспечивается с помощью простых и надежных статических устройств (диафрагмы, переливы). Такое регулирование позволяет избежать расхождений между общим расходом выходящего фильтрата и расходом входящей исходной воды, как это происходит при регулировании по измерению расхода. Именно по этим причинам компания «Дегремон» предпочитает данный тип регулирования. Кроме того, когда один фильтр останавливается (для промывки), общий расход входящей исходной воды автоматически перераспределяется на продолжающие работать фильтры

5.2.2. Регуляторы фильтров

5.2.2.1. Регулирование уровня с помощью сифона



Рис. 23. Регулирование с помощью сифона с устройством ввода воздуха для управления расходом

Концентрический сифон компании «Дегремон» и его **коробка управления** (рис. 23) позволяют осуществлять регулирование уровня воды, при этом коробка управления является устройством измерения (уровня) и управления, а сифон — устройством регулирования расхода

■ Сифон

Сифон состоит из двух концентрических цилиндров, образующих внутреннюю и внешнюю камеры, при этом поток идет от внутренней камеры к внешней

Если ввести воздух в верхнюю часть сифона, он увлекается водой в нижнюю камеру, где плотность потока смеси воздух-вода снижается, уменьшая таким образом высоту перепада в седловине сифона. Без этого воздуха высота перепада в седловине сифона равна, с точностью потери напора в ветви нижнего течения, высоте H (рис. 24) перепада между поверхностью воды над загрузкой фильтра и поверхностью воды в канале приема фильтрата. При введении в сифон воздуха эта высота сокращается на величину h_1 , равную произведению высоты H на плотность потока смеси воздух-вода. Разница $H - h_1 = h_2$ представляет собой потерю напора, создаваемую в результате введения в сифон воздуха

Если h_1 — это сумма потерь напора в чистом фильтре при прохождении исходной воды через фильтрующий слой, несущий пол с колпачковой дренажной системой и

трубопровод отвода фильтрованной воды вплоть до седловины сифона, то h_2 — это остающаяся для полезного использования высота забивания загрузки фильтрующего слоя

Следовательно, достаточно в чистый фильтр ввести количество воздуха, необходимое для создания потери напора h_2 , и тогда по мере загрязнения слоя фильтрующей загрузки можно снижать расход вводимого воздуха до полного его исчезновения, чтобы увеличить величину h_1 до H .

■ **Коробка управления подачей воздуха в сифон регулирования**

Коробка управления подачей воздуха в сифон регулирования с поплавковым воздушным клапаном (фото 9) позволяет ввести воздух в верхнюю часть сифона, чтобы тем самым регулировать расход воды. Воздух проходит в сифон через отверстие, сечение которого изменяется с помощью подвижного приспособления, состоящего из поплавка и оттягивающей пружины (см. рис. 24).

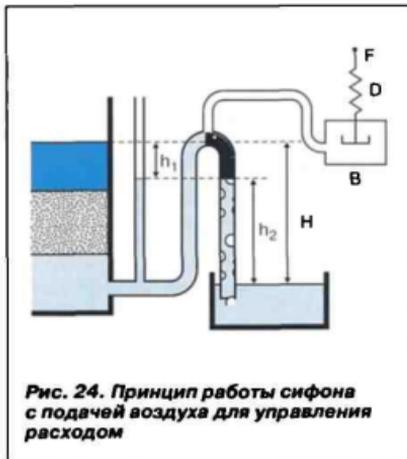


Рис. 24. Принцип работы сифона с подачей воздуха для управления расходом

5.2.2.2. Регулирование уровня с помощью дискового затвора: система Régulazur

Система Régulazur (рис. 25) — это система регулирования, разработанная компанией «Дегремон» на промышленном программируемом автомате, автомат приводит в действие дисковый затвор регулирования (2), установленный на трубопроводе отвода фильтрата, создавая дополнительную потерю напора, компенсирующую загрязнение фильтра. Система Régulazur определяет движение затвора в зависимости от сигналов, поступающих от датчика уровня (6) и датчика положения затвора (8), для того чтобы:

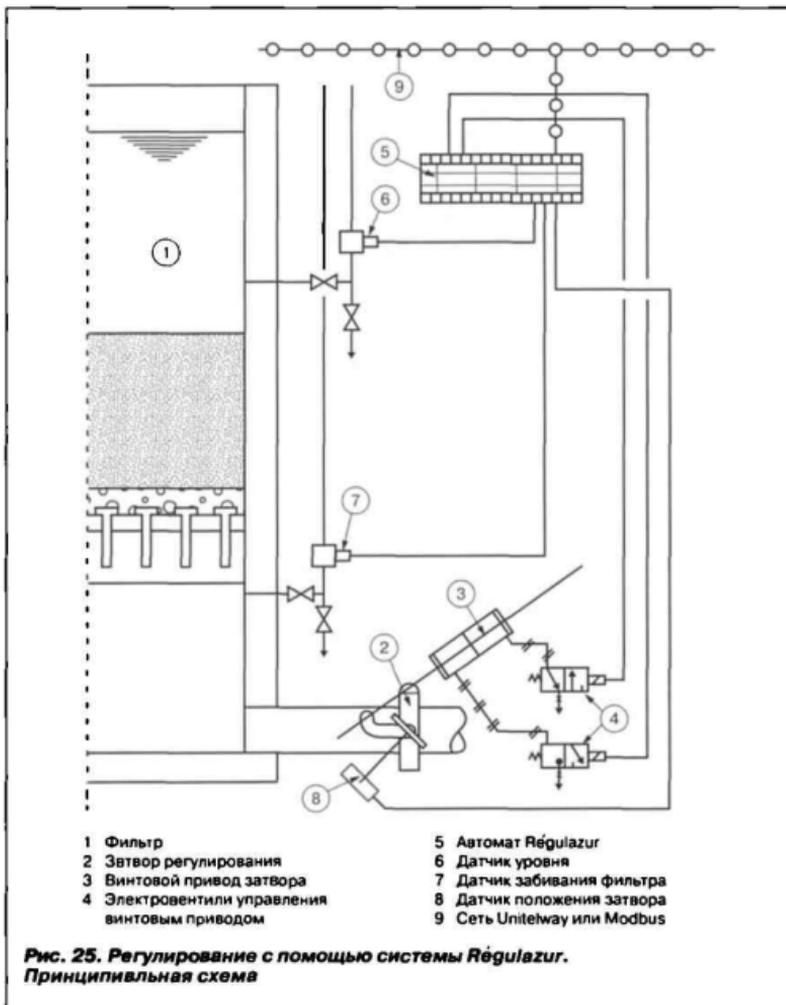
- в установленном режиме уровень воды в фильтре поддерживался около своего установленного значения при любой величине расхода фильтрата,
- во время запуска после промывки или во время изменения подачи исходной воды фильтр поступательно увеличивал скорость без перебоев, чтобы свести к минимуму скачки мутности на выходе

Система Régulazur получает также от датчика (7) информацию о степени забивания фильтрующего слоя и может, таким образом, начать промывку, когда достигнут ее максимальный уровень.

Каждый фильтр снабжен регулятором Régulazur, все устройства Régulazur фильтрующей батареи обычно связаны с сетью коммуникации (Unitelway, Modbus и др.), с которой также соединен главный автомат



Фото 9



В этом случае:

- многочисленное оборудование **каждого** фильтра (задвижки, датчики и т. д.) связано с соответствующим регулятором Régulazur, который через сеть передает в главный автомат информацию, выданную соединенными с ним датчиками,
- задвижки и датчики оборудования промывки и дополнительные устройства, общие для батареи фильтров, соединены с главным автоматом.

Главный автомат обеспечивает управление работой и промывками комплекса фильтрующей батареи, управляя регулированием и задвижками каждого фильтра и передавая свои команды через регулятор Régulazur, при этом последний управляет положением дискового затвора регулирования

В системе Régulazur объединены все принципы, которые характеризуют хорошее регулирование фильтра, и, таким образом, она является наиболее совершенным решением в этой области, обеспечивая

- устойчивый мгновенный расход и медленное изменение расхода воды при каждом изменении режима работы станции, а следовательно, постоянное качество фильтрованной воды;
- регулирование по верхнему течению с постоянным уровнем воды — стабильность высоты воды над фильтрующим слоем позволяет избежать риска случайного снижения давления в фильтре;
- надежность (использование немногочисленных простых и надежных датчиков и сетевых автоматов в испытанной технологии фильтрации);
- оптимальное управление батареями фильтров, включая регулирование и управление промывками

5.3. Фильтры с убывающим потоком фильтрата

Некоторые батареи открытых фильтров могут работать с изменяющейся подачей исходной воды без индивидуального регулирования и без больших колебаний уровня (рис. 26). В этом случае фильтры питаются отстоянной водой, поступающей из



одного трубопровода или канала без перепада по высоте, поскольку нет необходимости осуществлять распределение.

Фильтрат поступает в резервуары при фильтрах (у каждого фильтра свой резервуар), перелив (9) которых рассчитан так, чтобы фильтрующий слой был покрыт водой при остановке фильтров или работе с небольшим расходом исходной воды. Каждый выход фильтра снабжен поворотным запорным вентилем (7), который дублируется вспомогательным вентилем (8), создающим дополнительную потерю напора. Подача исходной воды через вентиль (1) регулируется в зависимости от уровня в резервуаре обработанной воды (11) благодаря датчику уровня (12) и общему регулятору (13)

В этой схеме регулируют дополнительную потерю напора p , созданную вентилем (8), таким образом, чтобы при максимальном расходе фильтрата Q на станции выполнялось следующее:

- расход фильтрата от каждого фильтра изменялся согласно его загрязнению $\pm m$ % среднего значения расхода Q/N , где N — число работающих фильтров. В результате после промывки расход фильтрата чистого фильтра равен $(1 + m/100) \times Q/N$, в расход фильтрате загрязненного фильтра до промывки равен $(1 - m/100) \times Q/N$. Обычно значения m удерживаются в районе 20–30 % согласно максимальной скорости на чистом песке;

- вызванная загрязнением фильтра потеря напора до промывки была такой, чтобы после возвращения к своему значению для средней скорости фильтрации она достигала обычных значений от 1,75 до 2 м.

Исходя из этих двух условий, определяют одновременно дополнительную потерю напора p и расчетный геометрический перепад на фильтрах.

Согласно схеме на рис. 26 поток исходной воды изменяется в зависимости от уровня в резервуаре фильтрата, и в результате изменяется уровень воды в фильтрах. Использование фильтров с убывающим потоком фильтрата требует знания его расхода из каждого фильтра, который может быть измерен по той же схеме: по высоте стенки перелива (9) или по потере напора из-за сокращения площади потока в регулирующем вентиле.

Описанный выше тип регулирования фильтров приводит:

- к большой высоте воды над фильтрующим слоем,
- к существенной высоте фильтра и, следовательно, к большому объему строительных работ, чем для фильтра, работающего с постоянной средней скоростью;
- к худшему качеству фильтрата в начале цикла вследствие большой начальной скорости;
- к длительному выводу фильтра из работы для промывки. Действительно, сначала следует слить большой объем воды над загрузкой фильтра, потом промыть фильтр и осуществить постепенный его запуск, на что обычно требует около 1 ч на каждый фильтр. Это может привести к необходимости увеличения числа фильтров в сравнении с классической системой регулирования;
- к относительно легкой эксплуатации, если общий расход и качество исходной воды постоянны;
- к эксплуатации, напротив, гораздо более сложной, если:
 - общий расход исходной, обрабатываемой на станции воды изменяется; тогда при каждом изменении общего расхода исходной воды нужно менять дополнительную потерю напора, созданную вентилем (8);
 - качество исходной воды внезапно ухудшается; в этом случае уровень в канале отстойной воды быстро поднимается, что вызывает опасность значительного переливания через край вследствие переполнения (4).



Глава

14

-
1. ПРОТИВОТОЧНАЯ РЕГЕНЕРАЦИЯ 1013
 2. ПОДВИЖНЫЕ СЛОИ 1018
 3. ЭЛЕКТРОДЕИОНИЗАЦИЯ 1022
 4. ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА 1022

Применение ионообменников

1. Противоточная регенерация

Механизмы и основы ионного обмена, а также технологии его использования были изложены в гл. 3, п. 11. Таким образом, выше уже было описано

— почему при прямоточной регенерации (именно этот способ был внедрен первым) невозможно подавать регенерирующий раствор непрерывно, когда он контактирует со слоями ионитов при ослабляющемся насыщении,

— почему в этом случае процесс регенерации заряженными ионами регенерирующего раствора в нижних слоях фильтра не обеспечивает получения нужного качества воды, в чем все больше нуждается промышленность

Противоточная регенерация позволяет избежать этих серьезных недостатков. При этом улучшаются качество обработанной воды и эффективность регенерации, а значит, уменьшается стоимость обработки. Способ противоточной регенерации заключается в пропускании регенерирующих растворов в направлении, обратном направлению обрабатываемой жидкости. Противоточная регенерация осуществляется в восходящем или нисходящем потоке в зависимости от направления фильтрации, выбранного во время фазы насыщения.

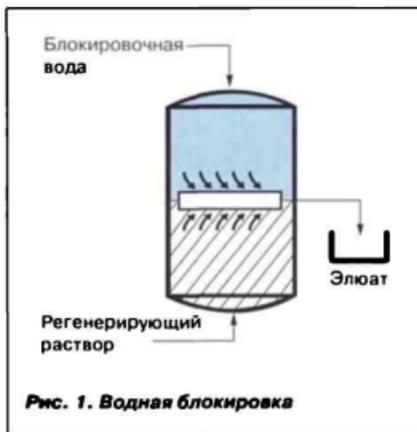
При регенерации во всех случаях необходимо избегать

— неравномерного распределения регенерирующих растворов, влекущего за собой вынос материала и недостаточный контакт между ионообменной смолой и регенерирующим раствором,

— смешения слоев, чреватого снижением градиента насыщения (чем выше градиент насыщения, тем более благоприятны условия для осуществления процесса противоточной регенерации)

Следовательно, требуется поддерживать высокую плотность ионообменного слоя на всем протяжении ввода регенирующего раствора и его замещения водой. Различные способы так называемой блокировки, предназначенные для ограничения расширения слоя смол, подразделяют на три категории

1.1. Водная блокировка



Водная блокировка — самый ранний из применяющихся способов

Регенирующий раствор вводится снизу в слой ионообменных смол, одновременно через верхнюю часть установки подается поток блокировочной воды. Вывод элюата осуществляется в точках отбора, расположенных в верхней части слоя смол (рис 1)

Согласно результатам регенерации при условии ограничения скорости восходящего потока до 2–2,5 м/ч качество обрабатываемой воды было удовлетворительным, однако для этого требовались повышенные дозы реагентов.

Сегодня этот способ практически не используется, так как разработаны более совершенные способы, о которых речь пойдет ниже.

1.2. Воздушная блокировка

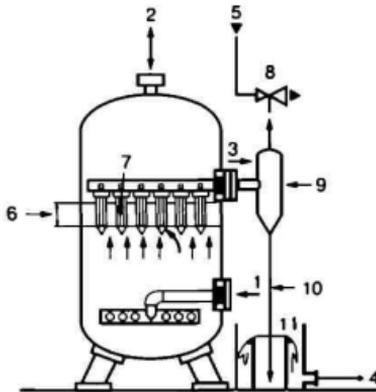
Данный способ предполагает частичное осушение верхнего слоя ионообменных смол, который при этом уплотняется значительно сильнее, чем при водной блокировке.

Все способы, основанные на данной технологии, осуществляются по следующей схеме:

- фильтрация обрабатываемой воды сверху вниз,
- регенерация снизу вверх.

Осушение производится в начале регенерации посредством опорожнения верхней части аппарата с помощью системы отвода элюата, расположенной в верхней части слоя смол. Оно поддерживается на всем протяжении ввода и замещения регенирующего раствора за счет воздуха, циркулирующего через осушенный слой. Смесь элюата с воздухом удаляется через систему отбора. Циркуляция воздуха создается за счет подачи сжатого воздуха повышенного давления или его отсоса с помощью внешнего устройства типа гидроэжектора (рис 2).

Воздушная блокировка обеспечивает хорошую эффективность регенерации, но из-за сложности системы этот способ практически вышел из употребления, уступив место механической блокировке слоев.



- 1 Ввод регенерирующего раствора
- 2 Связь с атмосферой
- 3 Отвод смеси элюат + воздух
- 4 Отвод элюата
- 5 Ввод рабочей воды
- 6 Осушаемый слой
- 7 Погружная трубка
- 8 Эжектор
- 9 Разделительная камера
- 10 Сифонная труба
- 11 Накопительная камера

Рис. 2. Блокировка посредством отсоса воздуха

1.3. Механическая блокировка

Из множества методов механической блокировки ионообменной смолы, таких, к примеру, как расширение мембраны в момент регенерации (рис 3), замена пустого пространства над слоем смолы инертным материалом, на практике чаще всего используется метод, при котором смола помещается между двумя устройствами (например, пластинами с дренажными колпачками), благодаря чему при подаче регенерирующего раствора и выводе элюата слой смолы не расширяется, а мертвый объем над смолой практически равен нулю.

Однако для применения этих способов нужна дополнительная колонна, в которую периодически будет перемещаться вся смола или ее часть для удаления мелких частиц ионита и/или взвешенных веществ (ВВ), поступивших с исходной водой и реагентами.

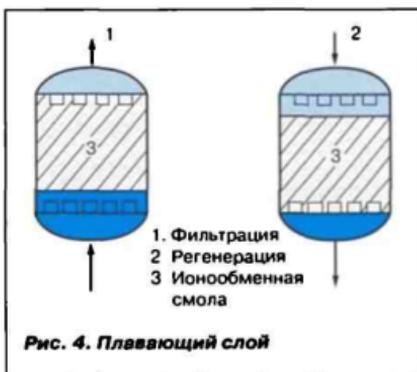
Все способы можно разделить на две категории в зависимости от направления фильтрации в производственном цикле, которое бывает восходящим или нисходящим.



Рис. 3. Мембранная механическая блокировка

1.3.1. Способы с восходящим потоком в производственном цикле

1.3.1.1. Плавающие слои



Фильтрация обрабатываемой воды идет снизу вверх, а регенерация — сверху вниз (рис. 4).

В рабочем режиме под действием скорости потока верхняя часть слоя ионообменных смол уплотняется о дренажную систему, тогда как нижний слой может частично находиться во взвешенном состоянии. Этот слой фиксирует большую часть ионов и работает до полного насыщения, тогда как верхняя часть фильтрующего слоя, которая регенерируется лучше, обеспечивает доочистку и качество обработанной воды. Сопла верхней пластины защищены слоем инертной смолы.

Недостаток данной системы — невозможность отключить или хотя бы в

значительной степени уменьшить расход обрабатываемой воды во время производственного цикла, так как это может повлечь за собой смешение слоев ионитов

Предлагаются различные варианты этой системы, в частности для исключения упомянутого выше недостатка или устранения промывной колонны.



1.3.1.2. Другие способы

Способ Лифтбетта (Liftbett) предусматривает разделение ионообменника на две расположенные друг над другом камеры (рис. 5) с помощью пластины с двойными соплами (3).

Верхняя камера целиком заполнена смолой, тогда как в нижней камере остается свободный объем, благодаря чему в ней возможна противоточная промывка слоя ионообменных смол. Две камеры соединены устройством (4), которое в случае необходимости обеспечивает гидравлическое перемещение смол. Это позволяет осуществить противоточную промывку в верхней камере посредством перемещения части смолы в нижнюю камеру. По завершении промывки смола возвращается обратно. Кроме того, данное устройство позволяет в любой момент прервать производственный цикл, так что при возобновлении работы качество воды не ухудшается. Действи-

тельно, слой доочистки в верхней камере остается плотным и не может перемещаться с уже насыщенной ионообменной смолой.

В способе Амберпака (Amberpack) используются уплотненный плавающий слой и внешняя промывная колонна, но нет инертной смолы.

1.3.2. Способ с нисходящим потоком в производственном цикле

В отличие от ионообменников с плавающими слоями фильтрация обрабатываемой воды при использовании метода UFD (up flow Degremont — восходящий поток компании «Дегремон») осуществляется сверху вниз, а регенерация — снизу вверх.

Способ UFD предусматривает применение колонны с двумя системами распределения и/или сбора элюатов (обычно это пластины с соплами, реже — разветвленные коллекторы), между которыми находится слой ионита (рис. 6) Этот слой занимает по меньшей мере 95 % объема между двумя системами

Блокировка слоя ионита при регенерации достигается с помощью фазы предварительного уплотнения, когда слой ионита попадает под сильный восходящий поток воды. Вследствие высокой скорости потока и небольшой свободной высоты слой ионита поднимается как поршень и блокируется о верхнюю систему отвода, не имея возможности для расширения, и, следовательно, устраняется опасность смешения слоев. После этапа уплотнения (несколько минут) степень уплотненности слоя ионита такова, что становится возможен ввод реагентов на значительно более низкой скорости, исключающий его падение и разрушение

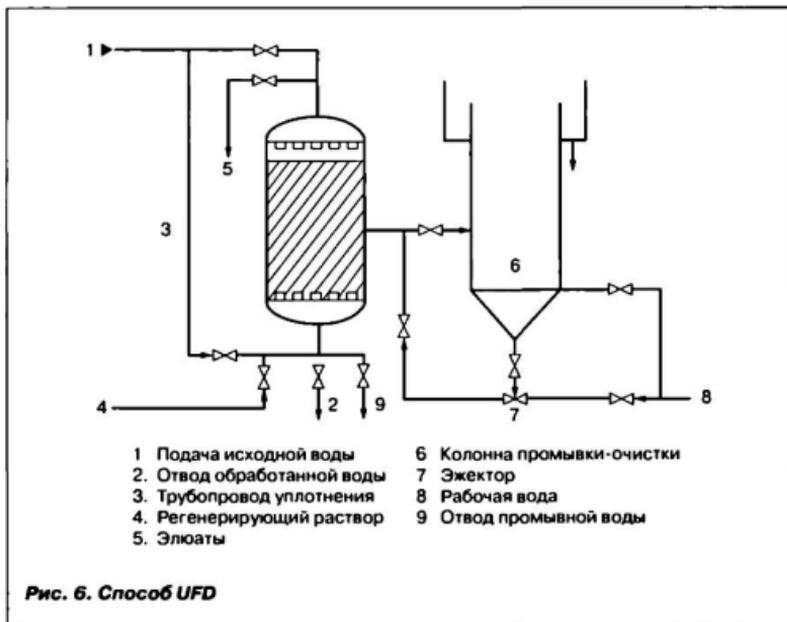


Рис. 6. Способ UFD

Поскольку фильтрация обрабатываемой воды осуществляется сверху вниз, изменение расхода или остановка подачи воды во время цикла не влияют на работу установки по способу UFD. Более того, если в воде имеются ВВ, они задержатся в верхней части слоя смол и будут по большей части удалены во время фазы уплотнения при следующей регенерации.

Верхняя часть слоя ионита или весь слой могут гидравлически перемещаться в промывочную колонну, после чего гидравлическим способом возвращаются назад в ионообменник. Частота выполнения этой операции зависит от падения производительности фильтра в рабочем цикле. Если вода чистая, то разрыхление слоя ионита и его чистку производят один раз в год.

1.3.3. Использование смешанных фильтрующих слоев

В одном устройстве можно совместно применять сильнофункциональную и слабофункциональную ионообменные смолы одинаковой полярности, отделив их друг от друга промежуточной пластиной с дренажными колпачками. Во время рабочего цикла ионного обмена обрабатываемая жидкость последовательно проходит через слабофункциональную, затем через сильнофункциональную смолу. Обратный путь реагент прорезывает во время фазы регенерации, что позволяет регенерировать «сильную» смолу с большим избытком реагента. Избыток рассчитывается так, чтобы его хватило на регенерацию «слабой» смолы. Таким образом, расход реагентов регенерации может достигать 105 % от теоретического для катионитов и 115 % для анионитов.

За счет своей простоты способ UFD прекрасно сочетается с применением смешанных фильтрующих слоев.

1.3.4. Эффективность ионообменников с противоточной регенерацией

При противоточной регенерации удается добиться значительно более высокого качества обрабатываемой воды, чем при прямоточной. При средней солености воды и среднем содержании в ней кремнезема удельная электропроводность воды после первой ступени очистки обычно составляет от 0,5 до 5 мкСм/см, а содержание кремнезема обычно ниже 50 мкг/л. Таким образом, использование противоточной регенерации часто позволяет исключить применение ступени доочистки при подготовке воды для котельных с котлами высокого давления и для некоторых видов производств.

2. Подвижные слои

2.1. Ионообменник непрерывного действия

Во всех описанных выше способах используются неподвижные слои ионообменных смол периодического действия, находящиеся в вертикальных цилиндрических аппаратах.

Для каждого аппарата характерен один цикл фильтрации, взрыхления ионита (смолы), регенерации и промывки, в конце которого ионообменник готов к новому циклу.

Такой способ имеет некоторые недостатки:

- зависимость расчета объемов смолы от требуемой продолжительности фильтроцикла между двумя регенерациями, а не от часового расхода, что при сильной солёности воды приводит к блокированию огромного количества смол,
- прерывание процесса производства очищенной жидкости во время регенерации ионита, что фактически вынуждает удваивать количество линий обработки или, что случается гораздо реже, предусматривать на период регенерации применение объемных накопителей обработанной жидкости

С другой стороны, в соответствии с тем, что рабочий цикл фильтрации требуется останавливать в момент, когда проскок ионов появляется на выходе из слоя, т. е. гораздо раньше насыщения всего объема смолы, эффективность фиксации ионов и регенерации ниже теоретической. Идея заменить классический способ на непрерывный противоточный процесс навела компанию «Дегремон» на разработку ионообменника непрерывного действия (ECI — от фр. *échangeur continu d'ions*)

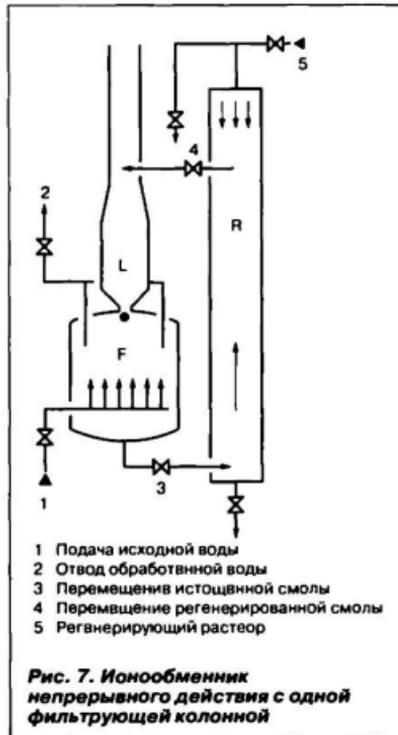
2.1.1. Ионообменник непрерывного действия с одной фильтрующей колонной

Самая простая схема представляет собой систему следующих аппаратов (рис 7):

- колонна фильтрации F для получения обработанной воды,
- колонна регенерации R;
- промывная колонна-очиститель L для удаления мелких частиц ионита и, возможно, ВВ, а также, если необходимо, для улучшения качества промывки регенерированного ионита

Процесс осуществляется как в колоннах **уплотненного слоя**. Ионообменная смола циркулирует полунепрерывно, с запрограммированными интервалами, перемещаясь с низа колонны фильтрации в колонну регенерации, из нее — в промывочный бункер, а затем снова поступает в колонну фильтрации. При условии когда все жидкости циркулируют в направлении, обратном движению смолы, обменные процессы, фиксация, регенерация, промывка осуществляются с оптимальной эффективностью, объемы смолы уменьшаются, а эффективность регенерации возрастает

Априори расход исходной жидкости, регенерирующего раствора, воды разбавления и промыв-



ной воды регулируется, а циркуляция ионита predetermined заданной частотой перемещений, осуществляемых из дозаторного отсека, расположенного в верхней части колонны регенерации. В случае изменения состава исходной жидкости изменяется интенсивность ввода регенерирующего раствора и скорости циркуляции ионита.

Описанное выше относится к простому ионообменнику, т. е. к установке.

— умягчения (катионитовая смола, регенерируемая хлористым натрием).

— удаления катионов (катионитовая смола, регенерируемая кислотой)

Для осуществления деминерализации классического типа с использованием двух отдельных ионообменников (катион + анион) достаточно последовательно расположить две идентичные системы, каждая из которых будет включать в себя по три колонны. В одной из систем используется катионитовая смола, регенерируемая кислотой, в другой — анионитовая смола, регенерируемая натрием или аммиаком.

Качество получаемой воды определяется проскоком ионов через катионит, который обуславливается уровнем регенерации и соленостью обрабатываемой жидкости.

Ионообменник непрерывного действия может работать и при загрузке смешанными слоями.

2.1.2. Особые преимущества ионообменников непрерывного действия компании «Дегремон»

По сравнению с другими методами непрерывного действия, которые в большинстве случаев (за исключением способа «Continuimat» компании «Häger-Elsasser») остались на стадии прототипов, способ компании «Дегремон» имеет следующие особые преимущества.

— ионообменные смолы и жидкости всегда циркулируют в противоположных направлениях по самому рациональному пути, так как регенерирующие растворы всегда подаются в хорошо уплотненную смолу,

— перемещение ионообменной смолы осуществляется гидравлически без применения какого-либо механического устройства;

— колонны фильтрации, регенерации или промывки рассчитываются независимо друг от друга и в каждом отдельном случае могут быть адаптированы к расходу и солености воды, а также эффективности регенерации,

— устройства распределения и уплотнения были тщательно проработаны с целью снижения до минимума высоты колонны и максимального приближения процесса к кривым равновесия.

Еще одно преимущество, присущее всем методам непрерывного действия, заключается в том, что кислотные и щелочные злюаты регенерации отводятся с небольшим **постоянным расходом**, а их нейтрализация, осуществить которую гораздо легче, чем при использовании ионообменников периодического действия, не требует резервуаров большой емкости.

Ввиду относительной сложности применение рассматриваемого способа целесообразно для систем с большими расходами и высокой скоростью насыщения смолы (к примеру, $> 10 \text{ м}^3/\text{ч}$).

2.2. Жидкие слои

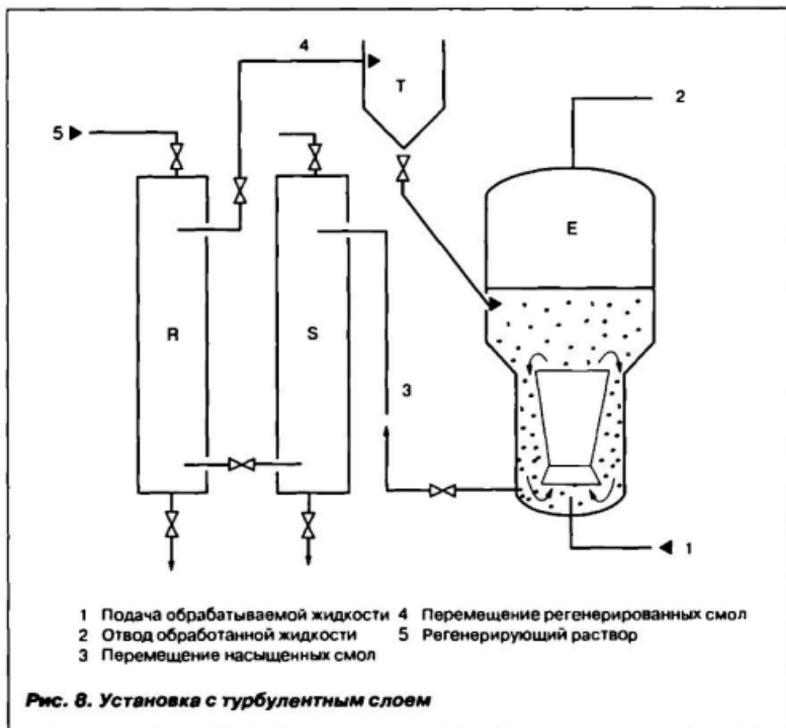
Иногда ионный обмен посредством фильтрации в колонне с уплотненной смолой невозможен либо из-за высокого содержания ВВ (урансодержащих взвесей) в об-

рабатываемой жидкости, либо из-за образования осадков во время обработки (перенасыщение малорастворимыми соединениями, изменение уровня pH и т. д.) В эти условия можно предусмотреть возможность расширения слоя ионообменных смол в колоннах восходящим потоком обрабатываемой жидкости. Чтобы добиться требуемого насыщения смолы и хорошего качества обрабатываемой жидкости, следует установить ряд из нескольких одинаковых колонн. В таком случае смола будет циркулировать из одной колонны в другую противотоком к движению обрабатываемой жидкости и в направлении к узлу регенерации.

2.3. Турбулентные слои

В некоторых случаях необходимо сильное перемешивание смолы с обрабатываемой жидкостью. Установка включает в себя (рис. 8).

- реактор (E) с активной частью типа Turbactor (см гл 10, п 1.3),
- разделительную колонну (S) типа ионообменника непрерывного действия,
- колонну регенерации (R) типа ионообменника непрерывного действия,
- загрузочный бункер (T) реактора для регенирированных ионов



3. Электродеионизация

Электродеионизация — это электрохимический метод, предусматривающий использование мембран и ионообменных смол без применения регенерирующих растворов. В связи с этим иногда данный метод описывается как непрерывная система электрической регенерации смол с использованием смешанных слоев. В действительности этот метод ближе к электродиализу, поэтому он изложен в гл. 3, п. 9.5.

Данный метод применяется для обработки хорошо осветленных вод слабой (< 50 мкСм) солёности. Используемый для конечной обработки, он выгодно заменяет метод смешанных слоев, в частности после обратного осмоса для создания системы обработки без применения химических реагентов (см. также гл. 25, пп. 1, 2 и 3, 4).

4. Дополнительная обработка

4.1. Удаление органических веществ

При описании методов ионного обмена подразумевалось, что исходная вода содержит только растворенные минеральные вещества.

В действительности в природной воде всегда в большей или меньшей степени содержатся органические вещества (ОВ), которые по-разному взаимодействуют с активными группами смол в зависимости от их строения. Некоторые ОВ полностью проходят через слой ионообменных смол, другие подвергаются обратимой фиксации и удаляются при регенерации, наконец, третьи фиксируются необратимо и «отравляют» смолы.

На практике последний недостаток свойствен прежде всего высокоосновным анионитам. Для катионитовых смол данная проблема почти не характерна, а в случае слабоосновных анионитов эти вещества подвергаются относительно обратной фиксации.

Чаще всего при использовании описанных выше систем удастся добиться удовлетворительных результатов в промышленных условиях при правильном выборе смол. Однако в некоторых случаях, в частности когда исходная вода содержит гумусовые соединения, было обнаружено, что классическое сочетание смол не обеспечивает ожидаемых результатов.

Когда речь идет о подобной исходной воде, требуется либо подвергнуть ее тщательной предварительной обработке в целях удаления гумусовых веществ (см. об обработке питьевой воды в гл. 22, п. 1), либо использовать анионитовые ионообменные смолы большой пористости и с большой абсорбирующей способностью в головной части системы, чтобы защитить собственно смолы деминерализации. Анионитовые смолы непосредственно фиксируют органические вещества, и последние вымываются обработкой хлористым натрием, а затем гидроксидом натрия или, что еще эффективнее, смесью соли и гидроксида натрия.

4.2. Специальное применение

Обработка воды — не единственная область применения ионообменных смол. Они часто служат практичным и эффективным средством решения проблем, возникающих при реализации химических процессов.

Обрабатываемые жидкости представляют собой водные или иногда органические растворы. В промышленности наиболее часто ионообменные смолы используются в рассматриваемых ниже случаях.

4.2.1. Обработка сладких соков

Умягчение заключается в замене ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} ионами Na^+ во избежание отложения накипи в выпаривателях. Применяется часто.

Частичная или полная деминерализация позволяет получить очень чистые сахарные, глюкозные сиропы. С помощью этого способа из виноградного сусла производят жидкий виноградный сахар.

Обесцвечивание может комбинироваться с деминерализацией благодаря адсорбционной способности правильно подобранной анионной смолы. Применяется непосредственно на адсорбирующей смоле (см. гл. 3, п. 11.2.5).



Фото 1. Установка для обесцвечивания свекольного сахарного сиропа на сахарно-рафинадном заводе в Тинене (Бельгия). Расход $30 \text{ м}^3/\text{ч}$

Замена одного иона другим — замена ионов Na^+ и K^+ более жесткими ионами Mg^{2+} (метод Квентина)

4.2.2. Применение на молокозаводе

Деминерализация и обесцвечивание разведенной или концентрированной сыворотки

Подкисление молока в результате контакта с сильноокислотной катионной смолой. Подобная обработка является частью запатентованного метода производства казеина

Удаление натрия обработка, предназначенная для производства диетического молока, заключающаяся в частичной замене ионов Na^+ в молоке ионами Ca^{2+} и Mg^{2+} , которые зафиксированы на смоле, регенерированной смесью солей кальция и магния

4.2.3. Обработка промышленных сточных вод

Обработка осуществляется в целях утилизации и/или концентрирования ценных веществ

Стабилизация работы ванн хромовой кислоты в процессах непрерывного хромирования задержание трехвалентного хрома и железа на сильноокислотной катионной смоле, что позволяет продлить срок использования ванны.

Обработка солянокислой ванны травления: наполнение железом снижает эффективность обработки. Комплекс трехвалентного железа в форме хлорида фиксируется на сильноосновной анионитовой смоле, что позволяет продлить срок использования ванны. Элюирование зафиксированного на смоле комплекса производится водой, при этом получается раствор хлористого железа, годного на продажу после концентрирования выпариванием.

Рекуперация шестивалентного хрома: промывные воды с низким содержанием бихромата натрия подвергаются обработке в линии сильный катионит – слабый анионит. Ионы бихромата элюируются содовым раствором. Часть полученного таким способом раствора щелочного хромата обрабатывается на сильном катионите. Получаемая хромовая кислота смешивается с остатком щелочного элюата, чтобы получить раствор бихромата натрия, используемый в производстве. Этот метод позволяет также повторно применять значительные объемы деминерализованной воды.

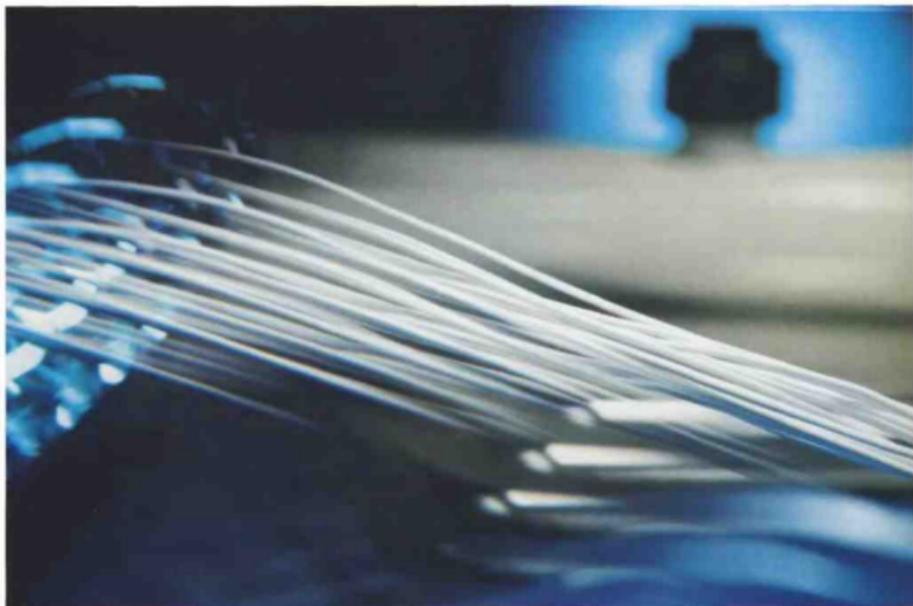
Рекуперация меди и аммония из сточных вод от производства синтетического текстиля. В зависимости от происхождения этих вод обработка осуществляется с применением либо слабых, либо сильных катионитов, регенерируемых серной кислотой. Растворы сульфата меди или аммония можно использовать повторно в производстве.

Рекуперация нитрата аммония из сточных вод от производства азотсодержащих удобрений. Речь также идет о концентрировании в системе сильный катионит – слабый анионит (обменники типа UFD, регенерируемые соответственно азотной кислотой и аммиаком). Этот способ представляет интерес, так как позволяет повторно применять деминерализованную воду, избавиться от утечек и сбросов без потребления реагентов, поскольку регенерационные элюаты повторно используются в производстве после возможного повторного концентрирования.

В фармацевтической промышленности возможно применение технологий, задействованных в хроматографии, которые позволяют отделить:

- несколько ионов друг от друга,
- электролит от неэлектролита,
- несколько неэлектролитов друг от друга.

Эти процессы осуществляются перемещением, избирательным перемещением, элюированием, исключением ионов и т. д. Однако внедрение данных технологий требует предварительных углубленных лабораторных и пилотных исследований



Глава

15

-
1. СУЩЕСТВУЮЩИЕ МОДУЛИ —
ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ФОРМА МОДУЛЕИ 1027
 2. РАЗНЫЕ ТИПЫ СОЕДИНЕНИЯ МОДУЛЕИ
(СИСТЕМА ОБЕССОЛИВАНИЯ) 1035
 3. ПРОЕКТИРОВАНИЕ МЕМБРАННЫХ
СИСТЕМ 1038
 4. ОСНОВНОЕ ПРИМЕНЕНИЕ МЕМБРАН 1051

Разделение на мембранах

В данной главе описываются различные варианты технологических решений, которые разработчик должен принимать в целях оптимизации работы мембранной системы для каждого конкретного случая применения. Сначала необходимо выбрать тип мембраны (модуль), затем определить расположение модулей и, наконец, выбрать рабочие параметры, которые будут определять эксплуатационные расходы и надежность работы всей системы.

В п. 4 описываются основные способы применения мембран для обработки питьевой и промышленной воды в целях обессоливания или повторного использования.

В гл. 3, п. 9, были рассмотрены различные виды мембран, а также приведены расчетные результаты разделения и основные параметры, определяющие эффективность работы мембран. В той же главе дан перечень терминов, необходимых для понимания дальнейшего материала.

1. Существующие модули — геометрическая форма модулей

Единичные устройства для мембранного разделения, называемые **модулями** или **элементами** (в случае спиральных модулей), разработаны для решения двух основных задач:

- обеспечение достаточной циркуляции фильтруемой жидкости на мембране, что необходимо для ограничения явления концентрационной поляризации (для мембран обессоливания), а также для предотвращения образования отложений на мембранах (для мембран осветления),
- создание компактного модуля, т. е. имеющего максимальную площадь фильтрации на единицу объема.

раллельно в цилиндрическом корпусе — весь узел представляет собой единичный модуль (рис. 1).

В таком модуле легко реализуется гидродинамический процесс движения жидкости, а если требуется высокая турбулентность, то система позволяет увеличивать скорость циркуляции до 6 м/с. Модули не требуют предварительной тонкой фильтрации жидкости, подлежащей обработке, а также их очень легко чистить с помощью периодического введения шариков из губки.

Основными недостатками трубчатых модулей являются их большие размеры и высокая себестоимость 1 м² площади фильтрации. Трубчатые модули особенно хорошо подходят для обработки вязких жидкостей или жидкостей с большим содержанием взвеси. Кроме того, они применяются для обработки воды, когда при небольших объемах обработки требуется контролировать образование отложений, поддерживая в жидкости определенную концентрацию кристаллических взвешенных частиц, или бороться с засорениями, удаляя их с помощью шариков из губки.

Такую же геометрическую форму имеют модули с керамическими мембранами (рис. 2), которые изготавливаются путем экструзии (выдавливания). Эти модули с успехом применяются в мембранных биореакторах при обработке промышленных сточных вод (ПСВ); необходимо отметить их чувствительность к наличию волокон.

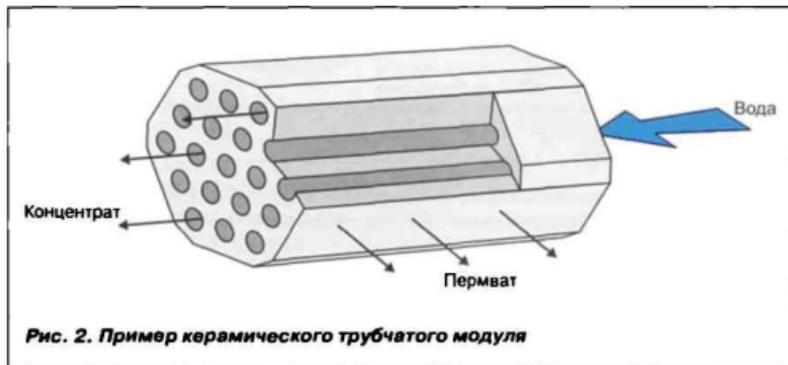


Рис. 2. Пример керамического трубчатого модуля

1.2. Модули с полыми волокнами

Полые волокна с диаметром от 0,6 до 2 мм изготавливают путем экструзии мембранного материала сквозь кольцеобразные фильеры. Такие модули называются самонесущими, так как большое соотношение толщины к диаметру позволяет им выдерживать рабочее внутреннее или внешнее давление.

Примечание. Некоторые полые волокна укрепляются с помощью тканевой сетки, погруженной в мембранный материал. Их часто группируют в пучки из нескольких тысяч волокон.

Обрабатываемая жидкость протекает либо внутри волокон (внутренняя фильтрующая поверхность), либо снаружи (внешняя фильтрующая поверхность).

Основное преимущество данной геометрической формы состоит в том, что она позволяет регулярно осуществлять обратную промывку (частота промывок может

варьироваться от 1 раза каждые 20 мин до 1 раза каждые 2 ч), при этом полые волокна работают при давлении, которое значительно ниже предельно допустимого для их раздавливания или разрыва



На рис. 3 показана классическая схема модуля ультрафильтрации с **внутренней поверхностью** фильтрации Aquavource — Ultrazur 450. Он содержит приблизительно 35 600 волокон размером 0,9 мм, что составляет площадь фильтрации 125 м². Такой модуль (см. гл. 3) может использоваться в режимах фронтальной или тангенциальной фильтрации.

Похожую геометрическую форму имеют модули с полыми волокнами и **внешней поверхностью** фильтрации, в которых циркуляция обрабатываемой воды происходит на поверхности волокон, а пермеат (фильтрат) накапливается на одном или на двух концах волокон. В таких модулях также легко осуществляется обратная промывка, но обычно их используют только во фронтальном режиме (так как в данном случае траектория движения жидкости между волокнами пучков оказывается более сложной). На рис. 4 показан погружной модуль ультрафильтрации с **внешней фильтрующей поверхностью**, у которого волокна не имеют внешнего корпуса. Они погружены прямо в воду или фильтруемую суспензию, при этом фильтрат втягивается («всасывается») сквозь стенки волокон за счет создания частичного вакуума (от 0,2 до 0,6 бар или от 20 000 до 60 000 Па).

За исключением некоторых модулей (см. модули с керамическими мембранами) и модулей с плоскими мембранами, предназначенных для мембранных биореакторов, все модули осветления (микрофильтрации или ультрафильтрации) выполняются в двух вариантах, а возможность легкой обратной промывки и небольшая потеря напора позволяют работать при давлении ниже 1 бар.

В настоящее время только японская компания «Тоубо» предлагает модули обратного осмоса «Holloserp» (для морской воды) тонкой половолоконной структуры с

внешним поверхностным слоем фильтрации, которая намного тоньше (130 мкм) структуры модулей ультра- и микрофильтрации, описанных выше. Это необходимо для того, чтобы при высоком сопротивлении на выдавливание (рабочее давление до 80 бар) обеспечить уменьшение размеров по сравнению со спиральными модулями.

Необходимо отметить, что все модули осветления требуется защищать от закупоривания крупными частицами внутренних отверстий полых волокон или нарушения свободного движения жидкости между волокнами с внешней поверхностью фильтрации. В начале технологической линии любой установки мембранного осветления необходимо размещать защитные микросита (от 150 до 500 мкм)

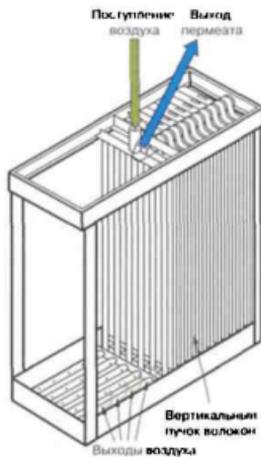


Рис. 4. Погружная кассета с полыми волокнами с внешней поверхностью фильтрации («Zeeveed 500С»)

1.3. Пластинчатые модули

Такие модули состоят из набора мембран и поддерживающих пластин.

Для микрофильтрации или обратного осмоса высокого давления подходит любой тип плоских мембран, но особенно часто такие мембраны используются для обработки сильно загрязненных жидкостей (производственные процессы, очистка ПСВ, мембранные биореакторы и т. д.)

По конструкции такие модули напоминают фильтр-прессы. Подлежащая обработке жидкость проходит между двумя сопряженными пластинами. Пластины обеспечивают как механическую поддержку мембран, так и дренаж пермеата. Сопряжение пластин позволяет жидкости циркулировать параллельно и/или последовательно. Единичная площадь фильтрации установки с комплектом таких мембран может достигать до 120 м². Пермеат, накапливаемый в желобах, выводится под действием давления (обратный осмос, нанофильтрация) или вакуума (ультрафильтрация, микрофильтрация). Толщина жидкой прослойки между пластинами составляет от 0,5 до 3 мм.

На рис. 5 показаны кассета и рама (пластина) одного из производителей плоских модулей ультрафильтрации.

Для мембран осветления предусматривается аэрация в основании модуля.

При средней компактности основное преимущество пластинчатых модулей состоит в том, что их легко демонтировать, что позволяет при необходимости проводить полную ручную чистку, а также без труда производить замену мембран. Но из-за длины и извилистой конфигурации канала циркуляции жидкости происходит

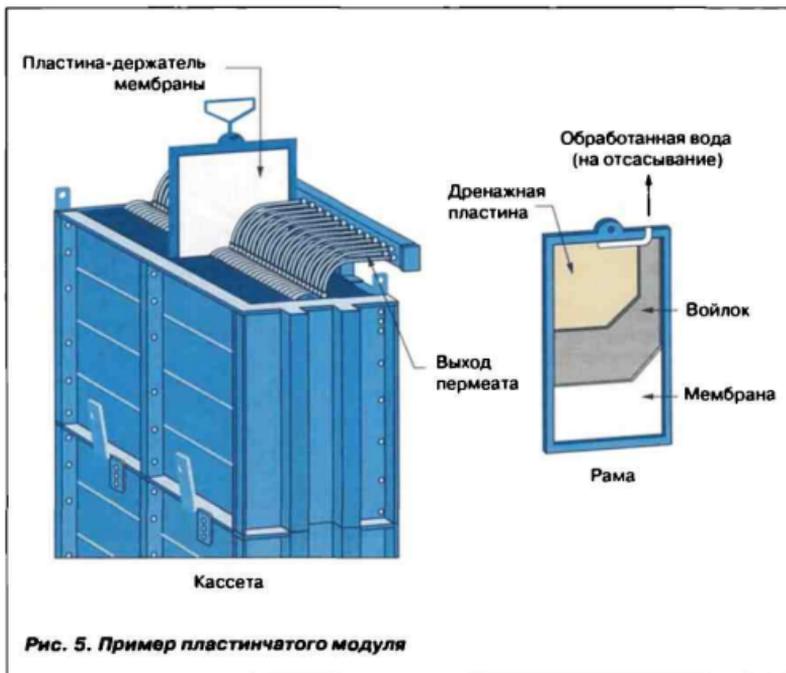


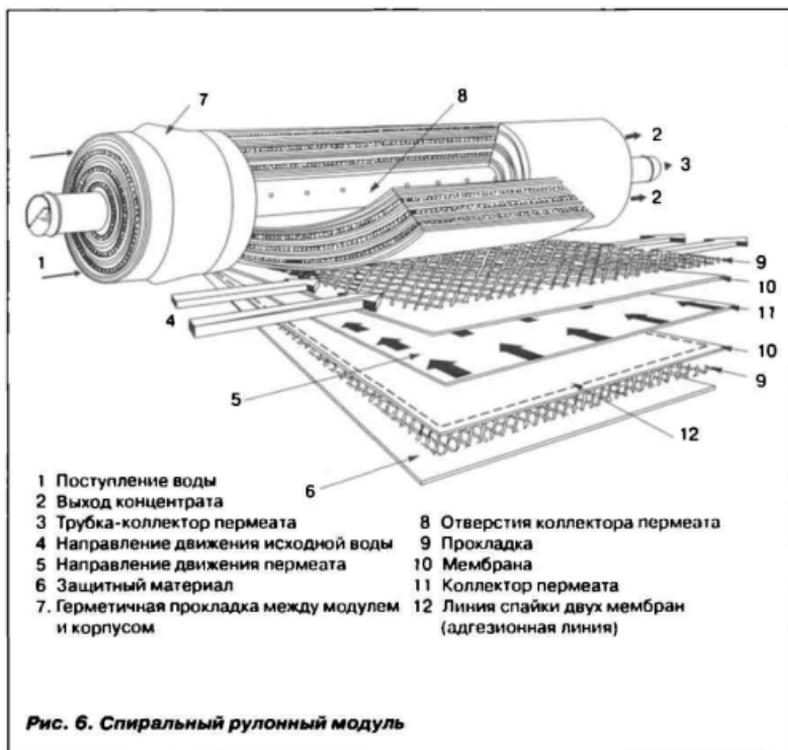
Рис. 5. Пример пластинчатого модуля

значительное падение напора, а небольшая площадь пластин ведет к увеличению их числа и, следовательно, их соединений, что снижает надежность установки.

1.4. Спиральные модули (рис. 6)

Между двумя плоскими мембранами (10) устанавливается пористый гибкий лист-коллектор (11) Такой «сэндвич» запечатывается с трех краев (12) Открытый край приваривается к цилиндрической трубке-коллектору (3) с двух сторон перфорированной направляющей. Таким образом фиксируется множество «сэндвичей», отделенных друг от друга с помощью прокладки-решетки из гибкого пластика (9). Фильтруемая жидкость циркулирует в прокладке (9) параллельно трубке-коллектору, а коллектор (11) обеспечивает дренаж пермеата к осевой трубке-коллектору (3)

Диаметр элемента может варьироваться от 5 до 30 см. За счет изменения длины (от 30 см до 1,5 м) мембранная поверхность может составлять от 0,3 до 41 м². Несколько элементов (от 2 до 8) устанавливают последовательно в едином цилиндрическом картере и присоединяют к трубке-коллектору (3) с помощью соединителей, снабженных кольцеобразными прокладками, которые должны обеспечивать идеальную герметичность и выдерживать компрессионные нагрузки, вызванные падением напора при движении жидкости сквозь прокладки модулей. Грамотный монтаж таких соединителей имеет большое значение для ограничения потери напора (максимум 0,5 бар на элемент)



В настоящее время практически все модули обессоливания (от нанофильтрации до обратного осмоса высокого давления) изготавливаются именно такой геометрической формы, за исключением уже упомянутых модулей «Holloser» японской компании «Тоубо». Действительно, эти модули являются самыми компактными из всех существующих и обеспечивают меньшее падение напора по сравнению с пластинчатыми мембранами. Однако они очень чувствительны к забиванию и, следовательно, требуют предварительной обработки жидкости для получения значений индекса забивания (Fi) ниже 4 или 5 (см гл. 5, п. 4.2.1). Выбор более толстых прокладок позволяет в некоторых случаях снизить чувствительность мембран к забиванию и облегчить химическую чистку таких модулей.

1.5. Сравнение модулей с различными геометрическими формами мембран

Конфигурация модуля ограничивает выход фильтрата (во Франции этот термин именуется «степень конверсии») (табл. 1), который имеет большое значение (см. гл. 3, п. 9). Выход фильтрата измеряется в процентах

Таблица 1
Выход фильтрата, %

Тип мембраны	Тип модуля			
	трубчатый (на 1 трубку)	половолоконный	пластинчатый (на 1 пластину)	спиральный (на 1 элемент)
Мембрана обессоливания	0,1–0,5	20–50	0,2–2,0	5–13
Мембрана осветления		15–30 ¹ 80–100 ²	80–100 ²	

¹ Тангенциальный режим

² Фронтальный режим

В табл. 2 показаны преимущества и недостатки различных типов мембранных модулей.

Таблица 2
Сравнение различных типов мембранных модулей

Критерии	Трубчатые (> 3 мм)	С полыми волокнами (< 2 мм)	Пластинчатые	Спиральные
Мембрана обессоливания	Да	Да	Да	> 95 % рынка
Мембрана осветления	Да	> 95 % рынка	Да	Нет
Компактность	–	++	+	++
Легко проводить очистку – in situ	++	+	+	+
– обратной промывкой	– ²	+++	–	–
Стоимость модуля на 1 м ² мембраны	–	+++	+	+++
ΔP (вход–слив)	+++	++ ¹	–	+
Мертвый объем ³	–	+++	+	++
Степень необходимой предварительной обработки	+++	+	+	–
Возможный выход фильтрата	Невысокий	Большой	Невысокий	Средний

Примечание

+++ – явное преимущество, – – явный недостаток, – – невозможно или не рекомендуется

¹ Может варьироваться в зависимости от соединения модулей, диаметра и типа волокон с внешней или внутренней поверхностью фильтрации

² За исключением некоторых керамических модулей, в которых слой, образующий мембрану, химически связан с подложкой (основой)

³ Для модулей с картаром

2. Разные типы соединения модулей (система обессоливания)

Ниже рассматриваются только установки обессоливания

Для мембран осветления, используемых при очень низких давлениях (< 2 бар), в отсутствие больших концентраций солей и, следовательно, без проблем выхода фильтрата, применяется только параллельное соединение всех модулей. Основной разницей между системами является наличие контура рециркуляции, что отличает так называемые фронтальные и тангенциальные системы, как это было показано в гл 3, п 9

2.1. Принципы работы

Принцип работы системы обессоливания (см гл 3, п 9) может быть представлен схемой, изображенной на рис 7

Питающий насос (4) и вентиль (7) регулируют независимо друг от друга рабочее давление подачи и выход фильтрата У (отношение объема пермеата к объему поступающей воды), о важности которого говорилось ранее (см гл 3, п 9 2)

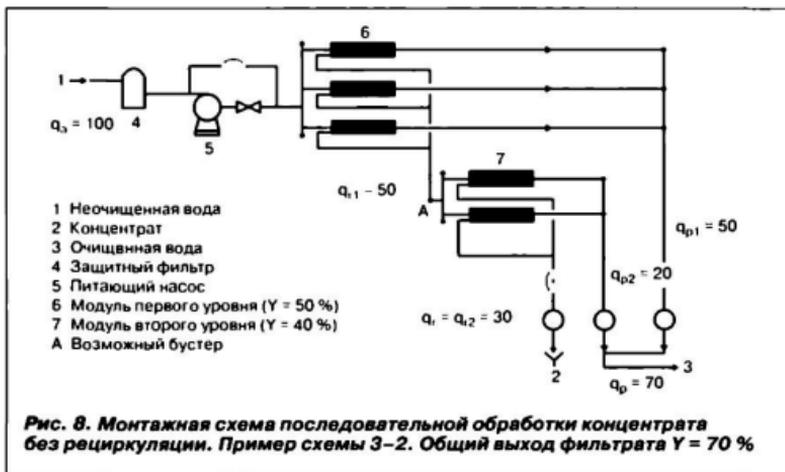
Тем не менее, поскольку при обессоливании требуется получить очень высокий выход фильтрата (в пределах ограничений по отложениям и выпадению осадка) и одновременно достаточно высокую скорость движения жидкости в каждом модуле (а это влечет плохое разделение в каждом модуле), выполнить эту задачу можно только с помощью системы, которая включает одновременно параллельное соединение модулей и либо рециркуляцию, либо добавление второго и даже третьего последовательных уровней обработки выходящего потока (концентрат первого уровня подается на второй и т д)



2.2. Монтаж последовательной системы обработки — сброс от мембран обессоливания

На рис 8 показана схема соединения, при которой сброс от трех групп модулей первого уровня поступает на две аналогичные группы модулей второго уровня. Такую схему называют схемой последовательной обработки концентрата 3–2 (по числу групп). С ее помощью можно добиться общего выхода фильтрата до 70 %, при этом на первом уровне будет произведено 50 % воды с помощью восьми последовательных элементов, помещенных в один корпус, а на втором уровне — 40 % при использовании семи элементов в одном

Примечание Как было показано в гл 3, п 9, при подаче 100 л исходной воды на первом уровне будет произведено 50 л, а на втором — 20 л очищенной воды, т. е. общий выход фильтрата составит 70 %



Для получения более высокого выхода фильтрата можно использовать трехуровневые системы с числом модулей 4–2–1 или 5–3–2 и др. Каждый раз необходимо проверять, чтобы объем промывки элемента, промываемого хуже всех (обычно это последний элемент в корпусе), был значительно больше рекомендованного изготовителем минимального объема, а объем потока на первый элемент как в процессе производства, так и в ходе промывки был ниже максимально допустимого.

Примечание Для небольших установок (особенно для пилотных) такой же результат можно получить, используя только один уровень (и даже применяя только один элемент), путем рециркуляции части концентрата [на рис. 9 показана установка, в которой модуль работает при $Y = 10\%$ (поступающий расход — $40 \text{ м}^3/\text{ч}$, расход пермеата — $4 \text{ м}^3/\text{ч}$), в то время как выход фильтрата всей установки составляет 80% (поступающий расход — $5 \text{ м}^3/\text{ч}$, расход пермеата — $1 \text{ м}^3/\text{ч}$)], т. е. концентрация слива увеличивается приблизительно в 5 раз по сравнению с концентрацией исходной воды. Такой модуль хорошо воспроизводит условия концентрирования в последнем элементе промышленной установки, однако его гидравлические параметры сравнимы с условиями работы первого элемента. Но он не может обеспечить соблюдение требований по времени пребывания воды в системе, что является важным при работе с ингибиторами отложений. Необходимо также добавить, что значительный нагрев циркулирующей воды зачастую требует регулирования рабочей температуры модуля.

Необходимо отметить, что на этом же принципе работы основаны установки микрофильтрации и ультрафильтрации с использованием рециркуляции (см. гл 3, п. 9), за исключением того, что сброс концентрата в таких системах происходит периодически (во время проведения обратной промывки) в отличие от вышеописанного непрерывного процесса.

■ **Монтаж системы последовательной обработки концентрата с применением насосов-бустеров (гидроусилителей) между уровнями**

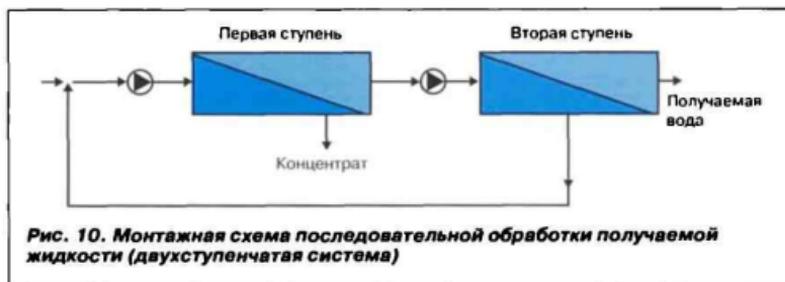
В некоторых случаях, когда требуется добиться высокого выхода фильтрата, целесообразно увеличить давление на втором и/или третьем уровнях, чтобы сохранить удельную производительность, соблюдая при этом допустимые гидравлические параметры. Этого можно достигнуть с помощью насосов-бустеров (гидроусилителей), расположенных между уровнями (см А на рис 8), которые будут компенсировать падение давления на первом уровне и увеличение осмотического давления



2.3. Монтаж системы последовательной обработки получаемой воды (многоступенчатая схема)

Если качество получаемой воды не соответствует требованиям, необходимым для дальнейшего применения (например, для производства ультрачистой воды, а также для технической или питьевой воды, получаемой из морской воды), то вода (или часть воды), получаемая на первом уровне, перекачивается на второй уровень, который может быть снабжен другим видом мембраны (на рис 10 — наиболее простой вариант). Для того чтобы не перепутать данную систему с вышеописанной системой последовательной обработки концентрата (см. п. 2.2), применительно к производству воды мы будем говорить о **системе с двумя ступенями (проходами)**, т. е. вода, полученная после первой ступени мембраны, подвергается последующей обработке путем вторичной фильтрации через мембрану (каждая ступень может включать несколько уровней)

Примечание. Качество концентрата второй ступени обычно лучше, чем поступающая на обработку вода, поэтому такой концентрат может быть рециркулирован в начало первого уровня



Основными эксплуатационными расходами являются энергетические затраты, что заставляет добиваться высоких значений выхода фильтрата, а это возможно только при выполнении **одновременно** трех необходимых условий

- соблюдение **внутренних гидравлических параметров**, которые определяют вид соединения модулей,
- ограничение **рисков образования отложений**, которые зависят от химического состава воды (см п 3 l 2),
- соблюдение требуемого минимального уровня качества обрабатываемой воды во избежание слишком быстрого **засорения** модулей (см п 3 l 3)

3.1.2. Риск образования отложений

За исключением отдельных случаев трубчатых или пластинчатых мембран совершенно неприемлемым является образование каких-либо отложений, накапливающихся в модуле, так как они очень быстро блокируют свободное движение воды в межмембранном пространстве. Для этого необходимо проверять, чтобы пары катион i – анион j не могли образовывать осадки в концентрате сливной жидкости и, следовательно, чтобы их концентрация в сливе не превышала соответствующее произведение растворимости соли ij (K_{sp}). Эту зависимость (при заданной температуре и уровне pH) можно представить следующим образом

$$C_{ii}, C_{jj} = \frac{10^4 C_{ii} C_{jj}}{(100 - Y)^2} < K_{sp}$$

или в другой форме

$$Y \cdot 100 \left(1 - \sqrt{\frac{C_{ii} C_{jj}}{K_{sp}}} \right)$$

где:

C_{ii} и C_{jj} — концентрация ионов i и j в обрабатываемой жидкости,

C_{ii} и C_{jj} — концентрация ионов i и j в концентрате

Необходимо отметить, что наименее растворимыми солями являются соли щелочно-земельных металлов, такие как CaCO_3 , $(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})$, CaF_2 , BaSO_4 , SrSO_4 , CaHPO_4 , а также все соли металлов (гидраты, сульфиды, фосфаты) и кремнезем

Таким образом, **тщательный анализ содержания всех этих компонентов** и их возможных изменений во времени является **необходимой основой для создания обоснованного проекта мембранной установки**.

В случае если хотя бы одна пара ионов ij ограничивает искомый выход фильтрата, существует три возможных способа решить эту проблему

- **ограничить Y** в соответствии с формулой, приведенной выше,
- **провести предварительную обработку воды для снижения концентрации иона i или j** . Для этого обычно используют
 - кислотную обработку жидкости, чтобы сократить содержание ионов HCO_3^- и, следовательно, исключить риск выпадения осадка карбоната кальция,
 - умягчение и/или декарбонатацию воды, чтобы удалить ионы Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} , а также некоторые металлы,
 - процессы удаления солей железа, марганца, кремния и т.д. (см гл. 3, п. 2).
- **использовать ингибиторы отложений** (вещества, аналогичные реагентам, применяемым для предотвращения образования отложений в котлах и других схемах охлаждения), которые за счет порогового эффекта и изменения кристаллической решетки выпадающих в осадок солей позволяют временно блокировать процесс его образования. В любом случае необходимо убедиться в совместности этих веществ
- с типом мембраны, это означает, что такие реагенты были изготовлены специально для этих целей,

- со всеми веществами, содержащимися в воде, а также с реагентами, используемыми для предварительной обработки

Необходимо отметить, что обратный осмос имеет два преимущества по сравнению с термическими методами, а именно

- осмос проводится при обычных температурах (обычно K_S (коэффициент проницаемости мембраны) снижается при росте температуры, исключение представляют растворы с высоким содержанием кремнезема),
- время пребывания воды в системе непродолжительно (всего несколько минут), кроме случая выключения установки на промывку

В последнем случае применение ингибитора вызывает необходимость оснащения установки системой **автоматической** промывки (даже в случае перебоев в электропитании), позволяющей восстановить работоспособность модулей с помощью стабильной воды (предварительно обработанной или воды, прошедшей обратный осмос), эту процедуру часто называют промывкой (англ. *flushing*)

Поставщики ингибиторов обычно указывают концентрации их перенасыщения (например, вдвое больше K_S)

Примечание Программное обеспечение для расчета проектируемой установки осмоса, используемое вместе с программами для расчета дозирования ингибиторов, позволяет получить растворимость наиболее часто «осаждающихся» солей концентрата с учетом присутствия или отсутствия ингибитора

На рис 11 приведены результаты таких расчетов в отсутствие ингибиторов (см рис 11, а) растворимость концентрата превосходит растворимость солей CaCO_3 , BaSO_4 , SrSO_4 , CaF_2 , SiO_2 , но при добавлении 3,80 мг/л ингибитора «Permatreat PC 510» (см. рис. 11, б) риск выпадения осадков исчезает, за исключением возможности осаждения кремнезема. Последнего можно избежать либо путем частичного обескремнивания, либо (что наиболее выгодно с экономической точки зрения) путем сокращения на несколько единиц выхода фильтрата, что обеспечивает достаточную защиту от выпадения осадков (см. рис 11, в)

3.1.3. Риск забивания мембран

Забивание мембраны вызывается отложением на мембранной поверхности любых частиц, которые не удаляются промывкой. Этот накапливающийся слой, так называемый кек, оказывая сопротивление потоку, вместе с сопротивлением самой мембраны провоцирует падение расхода фильтрационного потока. Кроме того, препятствуя обратной диффузии солей, задерживаемых мембраной, этот осадок усиливает явление концентрационной поляризации. Наконец, забивая свободные пространства в прокладках, кек провоцирует падение давления в циркулирующей жидкости, а также становится причиной плохой промывки всей поверхности мембраны.

3.1.3.1. Основные причины забивания мембран

Основные компоненты, которые обычно накапливаются на мембранных поверхностях, можно разделить на три типа

■ Коллоиды поступающей воды

Среди них наиболее распространены

- шламы поверхностных вод (часто мелкодисперсная глина), возможно, мелкий песок, микроводоросли, даже мертвые микроорганизмы,
- жиры, углеводороды, нерастворимые полимеры, которые особенно опасны, так как могут образовывать необратимые пленки на мембранах и вызвать чрезвычайно резкое снижение расхода воды

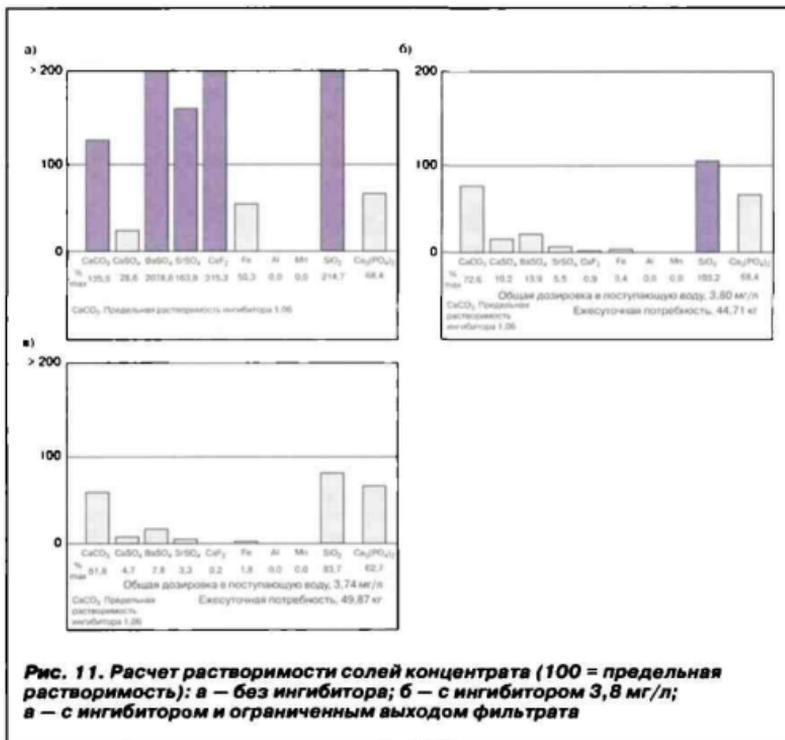


Рис. 11. Расчет растворимости солей концентрата (100 = предельная растворимость): а – без ингибитора; б – с ингибитором 3,8 мг/л; в – с ингибитором и ограниченным выходом фильтрата

■ Оксиды-гидроксиды

Сульфиды металлов могут осаждаться на мембранных поверхностях в зависимости от величины pH и концентрационного фактора, а также приводить к образованию сжимаемых и, следовательно, очень устойчивых отложений (см гл. 2, п. 3.3.4.2)

■ Биологическое обрастание

Если микроорганизмы (бактерии, грибки, дрожжи) в небольших количествах присутствуют в исходной воде, то они накапливаются вместе с другими коллоидными частицами на всей поверхности мембраны. Если при этом микроорганизмы находят питательную среду, а именно достаточное количество биологически разлагаемого растворенного органического углерода (БРОУ), то вне зависимости от происхождения такого углерода (природный углерод или углерод, привнесенный с загрязнением, побочный продукт окисления и т. д.) микроорганизмы будут интенсивно размножаться. Постепенно они будут прикрепляться к мембране с помощью своих экзополимеров, которые вызывают образование биологической пленки (тонкого слоя организмов), подобной биопленкам устойчивых биокультур. Кроме того, биопленка будет включать уже упомянутые продукты (оксиды, гидроксиды, коллоиды и т. д.)

3.1.3.2. Последствия забивания

Вне зависимости от природы загрязняющих веществ забивание мембраны вызывает следующие эффекты

- увеличение **потери напора** — часто именно этот параметр предупреждает об опасности,
- увеличение **прохода соли** (см. увеличение концентрационной поляризации, гл 3, п 9.2 1),
- падение **расхода потока**.

Для того чтобы вовремя решить эту проблему, необходимо регулярно контролировать результаты работы мембранной установки, что позволяет быстро фиксировать отклонения и предполагает правильную интерпретацию показаний приборов. Действительно, как уже было показано, увеличение расхода воды, вызванное, например, намеренным снижением выхода фильтрата и флуктуациями температур, будет вызывать те же самые проявления, что и чрезмерное забивание: увеличение потери напора и изменение расхода потока. Таким образом, до оценки состояния установки **необходимо предварительно стандартизировать полученные результаты**, т. е. провести расчеты работы установки при стандартных значениях давления, температуры, выхода фильтрата. На основе стандартизированных результатов можно объективно оценить, являются ли изменения потери напора, прохода соли и расхода потока значимыми, и принять правильное решение о необходимости химической чистки мембранной установки.

3.1.3.3. Средства, позволяющие минимизировать забивание

Для того чтобы минимизировать забивание мембраны, можно использовать следующие четыре стратегических решения (отдельно или в сочетании)

■ Предварительная обработка

Оптимизированное осветление с последующей фильтрацией (при необходимости на двух последовательных стадиях) позволяет практически во всех случаях извлечь из воды все коллоидные частицы, что можно проверить с помощью теста на индекс забивания (см гл. 5, п 4 2 1). Надо сказать, что эти параметры действительно являются лучшими критериями, по которым можно судить о забивании модуля.

Изготовители спиральных модулей рекомендуют использовать их для обработки воды со значениями индекса забивания меньше 4 или 5. Однако, как показывает практика, необходимо иметь воду с нормальным индексом забивания (меньше 3), а еще лучше меньше 2,5 с возможными периодическими предельными значениями 4 или 5, поскольку при этом установка действительно будет работать без перебоев.

Несмотря на то что не существует универсальной зависимости индекса забивания мембраны от мутности, значение $FI < 3$ соответствует обычно 0,15 NTU, что подтверждает особую необходимость эффективного осветления воды в целях ее подготовки для обработки в спиральных мембранных модулях. Например, для поверхностных вод (озерных или морских), которые считаются достаточно чистыми (уровень мутности < 2 NTU), часто необходима двухступенчатая фильтрация с коагуляцией: зазем воды перед одной из двух ступеней в целях получения соответствующего значения индекса забивания. Кроме того, для решения проблем, связанных с резкими аномальными повышениями мутности и бурным развитием водорослей, целесообразно применять флотационную обработку исходной воды (например, флотацию по способу **Rictor AquaDAF**).

Полимеры, о положительном влиянии которых говорилось в гл 3, п 1, в данном случае должны применяться с большой осторожностью (особенно их выбор и дозировка), чтобы не допустить необратимой адсорбции этих веществ на мембране. Мембранное

осветление (в сочетании с отстойником и, при необходимости, с флотатором) представляется рациональным техническим решением проблемы (см п 4 2 1)

Грамотное проектирование технологической линии предварительной обработки имеет ключевое значение для обеспечения надежной работы установки, которая в дальнейшем будет требовать минимальной промывки, а для установок осмоса предварительная обработка воды будет залогом продолжительного срока службы осмотических модулей (от 6 до 10 лет в различных случаях) Разработка линии предварительной обработки воды требует высокой квалификации, поэтому для выполнения такой задачи следует использовать опыт лучших технических специалистов (необходимо знать не только характеристики используемых вод, но и самые последние технологические разработки в этой области)

■ Выбор гидравлической нагрузки, или удельной производительности

Определение удельной производительности (т е объем пермеата на 1 м^2 мембраны в час), выражаемой в $\text{л}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, является чрезвычайно важным этапом расчетов. Действительно, чем выше эта величина, тем больше коллоидных частиц попадет каждый час на единицу поверхности мембраны, что требует более частой промывки модуля Для того чтобы решить эту проблему, нужно либо выбирать более совершенные системы предварительной обработки, либо ограничиваться более низкими значениями выхода фильтрата для создания мощного омывающего потока (что требует повышенных расходов) И наоборот, выбор оптимальных значений удельной производительности, особенно в первых элементах установки, позволяет ограничить увеличение ΔP и обеспечить приемлемую частоту промывок.

Рис 12 и 13 иллюстрируют трудности определения оптимальной пропускной способности мембраны для установки обработки морской воды, показывая реальное расположение по уровням расходов в одном корпусе давления (в последовательной схеме из семи элементов) Так, например, средний расход, составляющий $14 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ при значении $Y = 50 \%$ (см рис 12), соответствует фактически первому элементу, где удельная производительность равна $28 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, и последнему элементу, где значение удельной производительности составляет лишь $4 \text{ л}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

Подобный выбор удельной производительности вызовет очень быстрое забивание первого элемента при обработке воды недостаточно высокого качества Ситуация улучшается только в том случае, если выход фильтрата составляет всего лишь 40%

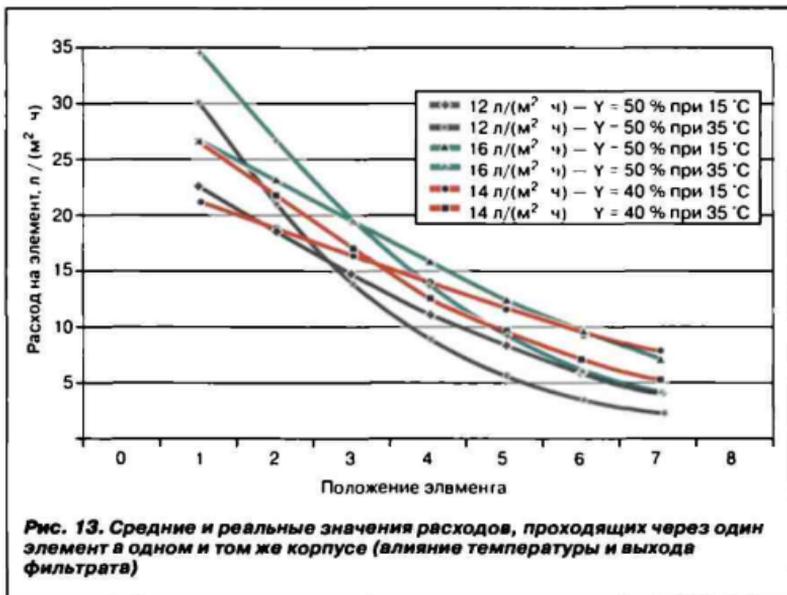
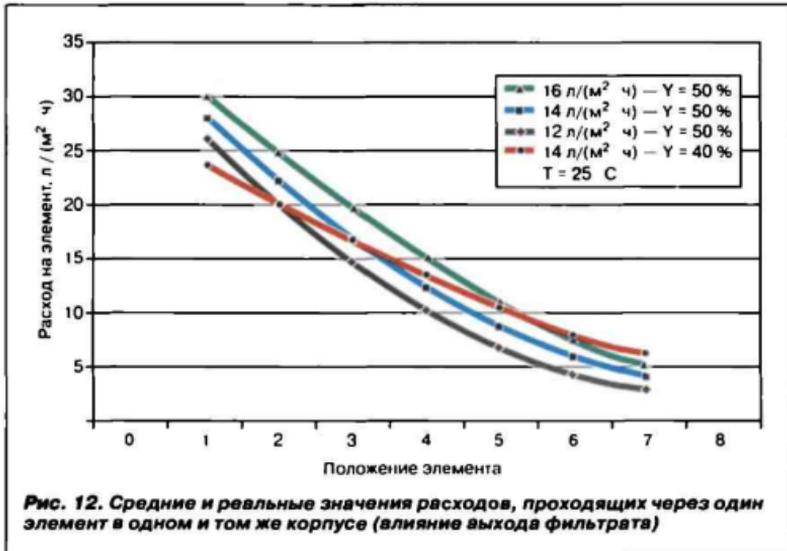
На рис 13 показано влияние температуры при постоянном выходе фильтрата, также можно увидеть очень высокий риск при одновременном росте трех параметров выход фильтрата, температура и расход обрабатываемой воды

— Если есть основания опасаться появления биологических образований, то необходимо либо попытаться удалить микроорганизмы (задача почти невыполнимая), либо постараться удалить источник питания БРОУ и питательные элементы, в частности фосфор

Кроме того, рекомендуется шоковое использование соответствующих бактерицидных средств (биоциды)

Примечание Регулярные промывки водой после обратного осмоса, вызывающие так называемые осмотические шоки, являются наиболее приемлемым решением для воды с высоким содержанием ($> 5 \text{ г}/\text{л}$)

— Последние технические инновации на рынке мембранных технологий представлены в виде мембран с повышенной устойчивостью к заиливанию, основанных на снижении поверхностного электростатического заряда, в результате чего мембрана захватывает меньше частиц Такие разработки с успехом нашли свое первое применение в области рециркуляции сточных вод (в классических системах или так называемых системах с двойными мембранами — см п 4.2.1)



3.1.4. Химическая чистка

Наряду с тщательной предварительной обработкой и грамотной разработкой конструкции установки (соединение модулей и т. д.), необходимо предусмотреть установку для периодической специальной промывки (чистки) модулей, которая должна

- последовательно подсоединяться к каждому уровню каждой линии системы (стационарная или легко подключаемая установка).
- обеспечивать циркуляцию чистящих растворов под небольшим давлением (необходимо не процедить, а промыть мембрану) в соответствии с имеющимися в распоряжении данными по составу отложений (для растворения осадков) или засорений (осадочный слой, который необходимо диспергировать), чтобы вернуть мембрану в исходное состояние

Основными реагентами для такой чистки являются кислоты (для растворения карбонатов и гидроксидов), хелатообразователи (оксиды-гидроксиды), поверхностно-активные диспергаторы (диспергирование минеральных или органических засорений), а также обеззараживающие реагенты (против биологических обрастаний) и т. д.

Практически во всех случаях наилучшие результаты приносит чередование пропитки и последующей циркуляции чистящих растворов [что позволяет разрыхлить и транспортировать кек (отложившийся осадок)] Если процессы отложения осадков и забивания отверстий мембран протекают длительное время, то каналы раздельных мембран блокируются до такой степени, что это затрудняет доступ очищающих растворов внутрь кека, и, следовательно, чистка в этом случае весьма трудоемка и продолжительна — от нескольких часов (2–4) до нескольких дней. Если же проблема отложения осадков и заиливания обнаруживается на ранней стадии, то чистка проходит легко.

Необходимо отметить, что при недостаточно глубокой чистке проблема отложения возникает вновь очень быстро, так как вещества, оставшиеся на мембране (например, неудаленные экзополимеры), служат центрами кристаллизации и препятствием для качественной очистки мембраны, а также питательной средой для размножения колоний биологических обрастаний.

Для крупных систем рекомендуется вскрывать один или несколько модулей, или головные элементы первых уровней (для обнаружения засоров), либо конечные элементы последних уровней (для обнаружения отложений) — такая процедура может оказаться очень информативной, так как она позволяет собрать осадки и/или отложения, провести их анализ и тем самым подобрать соответствующие реагенты для проведения химической чистки.

Наконец, наличие установок, способной тестировать и чистить несколько элементов системы, обеспечивает правильное проведение чистки.

3.2. Системы, использующие мембраны осветления

3.2.1. Модули

В отличие от систем обессоливания, состоящих из взаимозаменяемых спиральных элементов, мембраны осветления представляют собой модули, геометрическая конфигурация и мембранный материал которых являются оригинальными, защищены соответствующими патентами и, следовательно, не подлежат взаимной замене, даже несмотря на то что (как было указано в гл. 1) 95 % таких установок представляют собой пучки полых волокон. В этом заключается их основное отличие от мембран обессоливания, в которых спиральные (рулонные) модули размером в дюймы отлично совместимы, взаимозаменяемы и даже могут использоваться в одном напорном корпусе.

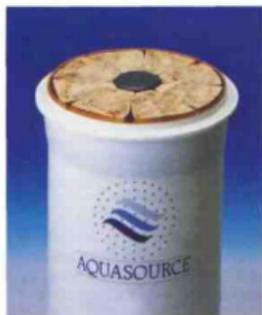


Фото 1. Модуль Aquasource



Фото 2. Модуль Zenon

На фото 1 и 2 показаны конфигурации модулей **Aquasource** (пример напорного модуля — полые волокна с внутренней поверхностью фильтрации) и **Zenon** (пример погружного модуля — полые волокна с внешней поверхностью фильтрации), обычно используемые компанией «Дегремон» (Практическое применение этих модулей будет рассматриваться отдельно)

3.2.2. Модули и блоки Aquasource

В табл. 5 приведены физические характеристики (в зависимости от типа мембраны) имеющихся модулей **Ultrazur** (с указанием внешнего диаметра их корпуса — например, для установки **Ultrazur 300** диаметр составляет 300 мм) Волокonné мембраны для этих модулей могут быть изготовлены из ацетата целлюлозы или гидрофильного полисульфона

Наименование	Число полых волокон (приблизительное)	Развернутая поверхность, м ²
Ultrazur Ø 100	2300	7
Ultrazur Ø 300	18 200	64
Ultrazur Ø 450	35 600	125

Выбор материала для мембраны зависит от различных критериев, приведенных в табл. 6

Обычно такие модули собираются следующим образом

— в виде *передвижного автономного комплекса*, включающего насос и группу модулей с системой автоматизации, предназначенного для небольших водопроводных станций;

— в виде *блока* (фото 3): комплекта модулей с коллекторами, соединенными с насосными системами, системой автоматизации и системой обратной промывки (в соответствии с принципиальной схемой, приведенной в гл. 3, п. 9, рис. 59 и 60). При этом блок может работать на 100 % во фронтальном режиме, а в тангенциальном режиме — постоянно или только периодически (например, при резком аномальном повышении мутности)

Таблица 6

Материал	Преимущества	Недостатки
Ацетатцеллюлоза ¹	Хорошо переносит обратную промывку и вследствие этого прекрасно подходит для обработки вод различной степени мутности Низкая скорость необратимого забивания мембраны	Чувствительность к присутствию микроорганизмов необходимо регулярное обеззараживание (обратная промывка с Cl ₂ или ClO ₂) Чувствительность к присутствию органических веществ (ОВ), в частности природного происхождения
Гидрофильный полисульфон ¹	Химическая устойчивость 2 < pH < 12, следовательно, можно проводить интенсивную промывку Малая чувствительность к присутствию общего органического углерода (ООУ) Не поддается биологическому разложению (нуждается в обработке окислителями только для контроля образования биопленок, а также для противодействия адсорбции ОВ)	Способность к обратной промывке ниже, чем у мембран, выполненных из ацетатцеллюлозы

¹ Точная формула является запатентованной собственностью компании - Aquazone se-



Фото 3. 96 модулей UltraZur 450 в четырех блоках с общей производительностью 24 000 м³/сут на заводе «la Jatte» (Руан, Франция)

3.2.3. Система с погружными мембранами

В табл. 7 указаны преимущества и недостатки работы погружных мембран по сравнению с напорными

	Преимущества	Недостатки
Модуль под давлением (фронтальный или тангенциальный режимы)	Трансмембранное давление составляет от 0,5 до 1,5 бар, обычно трансмембранный поток является высоким [от 100 до 200 л/(м ² · ч) при 20 °С]	Ограничение по уровню мутности поступающей воды даже в тангенциальном режиме
Погружной модуль (только во фронтальном режиме)	Возможность погружения в реактор - упрощенный модуль (нет корпуса и системы питания), - «всасывающий» модуль, - проведение глубокого осветления воды в гидроксидном слое (обесцвечивание и др.), - вторичное осветление после обработки активным илом по способу (мембранного биореактора), см гл. 3, п. 9, и п. 4.1 данной главы	- Ограниченное трансмембранное давление (от 0,3 до 1,5 бар); слабый поток (от 20 до 80 л/(м ² · ч) - Необходимость хотя бы периодически создавать турбулентное движение жидкости вдоль мембраны с помощью перемешивания воздухом - Необходимость частых промывок

Для такой технологии типичной является установка с погружными мембранами компании -Zepon-

■ Мембраны, погруженные в обрабатываемую воду или даже в слой осадков: модули «Zeeweed 500»

Такие модули, состоящие из пластов укрепленных полых волокон, которые закреплены в верхней части особым способом, могут быть объединены в кассеты, включающие несколько модулей (10, 20, 60) с одним источником питания, одним выходом пермеата и одним воздушным коллектором. На фото 4 показана кассета, объединяющая 16 модулей (максимально возможное число модулей — 22), во время монтажа

Виды обратной промывки можно классифицировать следующим образом:

- собственно обратные промывки, а именно промывки очищенной хлорированной или подкисленной водой,
- глубокие обратные промывки с замачиванием (которое может длиться от нескольких минут до 1–2 ч) в более концентрированных растворах, например содержащих от 200 до 2000 мг/л Cl₂, лимонную кислоту и т. д.,
- химические чистки, называемые регенерацией, проводимые путем либо извлечения кассеты и ее погружения в бак *ad hoc* (лат. — предназначенный специально для этой цели), либо — имеет место на крупных станциях — чистки всей кассеты в одном и том же резервуаре (что подразумевает наличие нескольких параллельных баков или остановку линии на срок от 8 до 16 ч)



Фото 4. Кассета модулей «Zeeweed 500»



Фото 5. Модуль «Zeeweed 1000» в кассетах

Такие модули погружаются в воду, подлежащую обработке, но они могут также погружаться и в слой осадков, состоящий либо из активных илов (см гла 9, п 1 6, реактор **Ultrafor**), либо из гидроксидов, а иногда и из порошкового активированного угля (ПАУ) (при обработке поверхностных вод или подземных вод с высоким содержанием Fe, Mn и OВ) В последнем случае перед баком погружения модулей необходимо установить резервуар флокуляции

■ **Мембраны, погружаемые в обрабатываемую воду с низкой мутностью**

(вода водохранилищ, хорошо осветленная вода, сточные воды после вторичного отстаивания, чистая морская вода и т д)

Такие мембраны, также изготовленные из полых волокон, но меньшего диаметра и без тканевого укрепления, фиксируются горизонтально в модулях, собранных на различных уровнях (фото 5) Модули «Zeeweed 1000» подвергаются обратной промывке путем воздушной инжекции с помощью системы, время работы которой ограничено периодом обратной промывки Таким образом могут проводиться глубокие промывки или мини-промывки Промывная вода отводится с помощью желобов, установленных на верху модулей, или путем опорожнения резервуара

Подобные системы, специально разработанные для крупных станций производительностью выше 500 м³/ч, отличаются большой компактностью и высокой экономичностью, однако они должны использоваться для обработки воды с невысокой мутностью (см выше), чтобы сохранить приемлемую частоту промывок Эти установки

могут быть применены в модернизации старых песчаных фильтров за счет повторного использования их строительных конструкций

3.2.4. Выбор рабочих параметров

При проектировании установки мембранного осветления в первую очередь следует выбрать

- фронтальный или тангенциальный режим работы (напорный модуль),
- рабочий расход в зависимости от температуры Этот параметр определяет число модулей, которые необходимо установить, а также количество накапливаемых веществ в период между двумя обратными промывками и, следовательно, частоту таких промывок Однако если расход слишком большой (выше так называемого «критического расхода»), то наблюдаются значительные колебания потоков и проницаемости мембраны — в этом случае помочь может только химическая чистка Таким образом, необходимо установить размер критического расхода на основе имеющегося опыта или с помощью пилотной установки. Компания

-Дегремон- определила различные «классы воды» в зависимости от содержания взвешенных веществ (ВВ), поглощения ультрафиолетового излучения (УФИ), отношения ООУ/УФИ, количества содержащихся водорослей и др., что позволяет прогнозировать величину максимального рабочего расхода

Напомним, что температура оказывает большое влияние на протекание процесса, особенно для поверхностных вод. Например, при изменении температуры от нескольких градусов зимой до 25 °С летом возникает отклонение рабочего расхода при постоянном трансмембранном давлении на 35 и даже на 45 %! Поэтому, чтобы не допустить проектирования излишне крупных установок, необходимо знать, остаются ли прежними потребности в очищенной воде в зимний период

Так же как и для обратного осмоса, в данном случае необходимо знать **все характеристики обрабатываемой воды**, а также их **сезонные изменения**. В частности, если в периоды пиковых нагрузок нет достаточных сведений о природе коллоидных веществ и уровне ООУ (растворенного и в частицах), то необходимо провести пилотные испытания на месте. Однако, чтобы правильно определить оптимальный расход воды, частоту обратных или вспомогательных промывок, необходимо предусмотреть как минимум трехмесячный испытательный период, включающий самые неблагоприятные для качества воды месяцы

Для некоторых вод с низкой мутностью, но содержащих ОВ, даже тонкий слой кека, откладывающийся на мембранной поверхности, может с трудом поддаваться обратной промывке (иногда в таких случаях говорят о «клейком» осадочном отложении). В такой ситуации может помочь микрокоагуляция с использованием металлосодержащих коагулянтов (в частности, $FeCl_3$) с концентрацией от 0,2 до 1,5 мг/л, которая значительно облегчает обратную промывку и, следовательно, восстанавливает нормальный рабочий расход

Для **удаления растворенных ОВ** собственно мембраны осветления оказываются неэффективны [слишком большой порог отсеивания (см. гл. 3, п. 9.3.1)] Однако такие мембраны служат прекрасным барьером для ПАУ, который может адсорбировать такие растворенные органические загрязнения, как пестициды и/или вещества, определяющие привкус воды. Эта способность мембран используется в системах **Aquasource** путем введения ПАУ в воду до ее подачи в блок ультраfiltrации, что составляет суть способа **Cristal**.

Идеальный для этого ПАУ должен состоять из частиц размером меньше 10 мкм, что определяет его высокие кинетические показатели адсорбции ОВ, но при этом не закупоривать поры волокна мембран. ПАУ вводится непосредственно в подаваемую на обработку воду, и в случае необходимости можно предусмотреть увеличение времени его контакта с водой (до нескольких минут). ПАУ накапливается в контуре рециркуляции и удаляется только при очередной обратной промывке. Понятно, что если на входе на станцию питьевой воды установлен отстойник со взвешенным слоем осадка (например, **Pulsator**) или с внешней рециркуляцией осадка (например, **Densadeg**), то не полностью насыщенный при контакте с водой в процессе ультраfiltrации ПАУ продолжает адсорбировать загрязнения при контакте с исходной и более загрязненной водой, поступающей из осветлителя (см. гл. 3, п. 10, и гл. 22, пп. 1.7.2, 1.7.3). Такая система, называемая **Cristal étendu** (расширенный способ **Cristal**), позволяет оптимальным образом использовать адсорбент

4. Основное применение мембран

Даже рассматривая только одну из областей применения мембран — обработку вод, можно сделать вывод, что применение мембран постоянно и быстро растет. Как пока-

зано на рис. 50 (гл. 3, п. 9), вне зависимости от решаемой проблемы мембранные установки способны извлечь чистую воду из любого водного потока за исключением некоторых редких случаев присутствия в нем органических молекул с низким молекулярным весом и высокой полярностью (например, простые спирты, кетоны и т. д.). Тем не менее энергозатраты, риск забивания мембран (заиливания) и выпадения осадков (образовании отложений), а также стоимость самих мембран остаются препятствиями для их более широкого распространения. Однако эти причины начинают терять свою актуальность. Так, например, о мембранах обессоливания можно сказать следующее:

- со времени появления их на рынке в 90-х гг. их цена в расчете на 1 м^2 сократилась вдвое;
- проницаемость таких мембран возросла;
- проход соли через них снизился при рабочем эквивалентном давлении;
- появление так называемых мембран «низкого давления» позволило в 2 раза снизить энергозатраты на обессоливание соленых вод;
- разработки все более совершенных ингибиторов позволяют раздвинуть границы применения мембран.

Быстрое развитие рынка мембран осветления, наблюдаемое с 1995 г., объясняется повышением эффективности их работы, а также снижением их стоимости.

Далее рассматриваются наиболее распространенные случаи применения мембран, а в гл. 22–26 будут приведены другие примеры использования мембран в технологических линиях обработки любых видов вод.

4.1. Применение мембран осветления

Мембраны осветления постепенно заменяют традиционные системы осветления в производстве питьевой или технической воды из природной или оборотной воды, а также в предварительной обработке воды для осмотических систем.

4.1.1. Питьевая вода

Очень быстрое развитие, начиная с 1990 г., этих технологий (см. также гл. 22, п. 17) объясняется двумя основными причинами:

- возможность **осветления воды без применения реагентов**, по крайней мере без образования осадков, так как сброс состоит только из коллоидных загрязнений, содержащихся в источнике (при полном отсутствии коагулянта-флокулянта), к которым все-таки добавляются реагенты при обратной промывке или очистке (Cl_2 , ClO_2 , кислота или щелочь и т. д.) и других промывках;
- применение **абсолютного барьера**, который (пока мембрана остается целостной) гарантирует постоянное и непревзойденное физическое и бактериологическое качество воды (по меньшей мере удаление простейших бактерий и вирусов с помощью мембранной ультрафильтрации).

Тем не менее для окончательной обработки питьевой воды рекомендуется применять обладающий длительным последствием обеззараживающий реагент для защиты сети распределения Cl_2 -хлорамин- ClO_2 . Поскольку на этой стадии потребность в хлоре или хлорсодержащих соединениях оказывается минимальной, то требуются очень небольшие дозы (обычно 0,2–0,3 мг/л для Cl_2).

Мембраны осветления используются

- для **одноуровневой обработки** малозагрязненных вод, в частности с невысоким содержанием органических веществ ($\text{ООУ} < 2 \text{ мг/л}$)
 - обработка вод плотин и водохранилищ (следует соблюдать осторожность в случае бурного развития водорослей);
 - обработка подземных вод (например, карстовых), на качество которых влияют поверхностные воды.

Примечание В таких случаях обычно добавляют активированный уголь (см. способ **Cristal**), чтобы одновременно снизить содержание некоторых «искусственных растворенных» ОБ, таких как пестициды, или обращаются к микрокоагуляции в случае с клейким слоем осадка (см. п. 3.2.4).

- для **одноуровневой комбинированной обработки** поверхностных вод с низкой мутностью (< 25 NTU), но содержащих большие количества природных ОБ. В этом случае погружные мембраны **в сочетании с устройством коагуляции-флокуляции** и, при необходимости, с введением ПАУ могут представлять альтернативу традиционным технологическим линиям типа прямое фильтрование – озонирование – фильтр с гранулированным активированным углем (ГАУ);
- в качестве **стадии доочистки** поверхностных вод после традиционной обработки, включающей **как минимум осветление** (хорошо рассчитанное отстаивание или флотацию), которая может не включать обработку на фильтре с ГАУ. Мембранная система будет в таком случае обеспечивать фильтрацию и обеззараживание, а также, в случае необходимости, доочистку ОБ за счет применения технологии **Cristal étendu** (расширенный **Cristal**);
- как средство гарантировать **исключительное бактериологическое качество** воды (в частности, удаление цист простейших и вирусов на мембранах ультрафильтрации), особенно если мембраны применяются на завершающем этапе обработки на классической водопроводной станции.

4.1.2. Обессоливание или повторное использование вод

Учитывая великолепные физические характеристики получаемого пермеата (отсутствие коллоидных частиц и бактерий), установку ультрафильтрации можно рекомендовать как предпочтительное техническое решение для удаления **забивающих мембраны частиц перед подачей воды на установку обратного осмоса** или нанофильтрации. В любом случае удастся добиться снижения индекса забивания на 1–3 единицы, что следует делать перед подачей воды на любую установку мембранного обессоливания морской воды, солончаковых вод и особенно для технологических линий повторного использования воды. Тем не менее при обработке морской воды требуется также удалять ОБ (макромолекулы), поэтому необходимым этапом предварительной обработки остается коагуляция-флокуляция. Отсутствие бактериологического загрязнения после мембраны ультрафильтрации вместе с тем помогает

- предотвратить образование биопленки, хотя остается необходимость удаления питательных веществ (см. гл. 3, п. 9);
- обеспечить безопасность технологической линии благодаря применению концепции двух последовательных абсолютных барьеров для любых видов патогенных микроорганизмов ультрафильтрации и обратного осмоса или ультрафильтрации и нанофильтрации.

Первое широкое применение в обработке сточных вод мембраны осветления нашли в области **повторного использования городских сточных вод (ГСВ)**, в частности в сочетании с осмотическими мембранами низкого давления (устойчивыми к заиливанию), в промышленном секторе (например, в производстве подпиточной воды для котлов) или для закачивания в подземные водоносные горизонты, для орошения некоторых культур, для полива площадок для гольфа, для парков и т. д.

4.1.3. Сточные воды – мембранный биореактор – установка *Ultrafor*

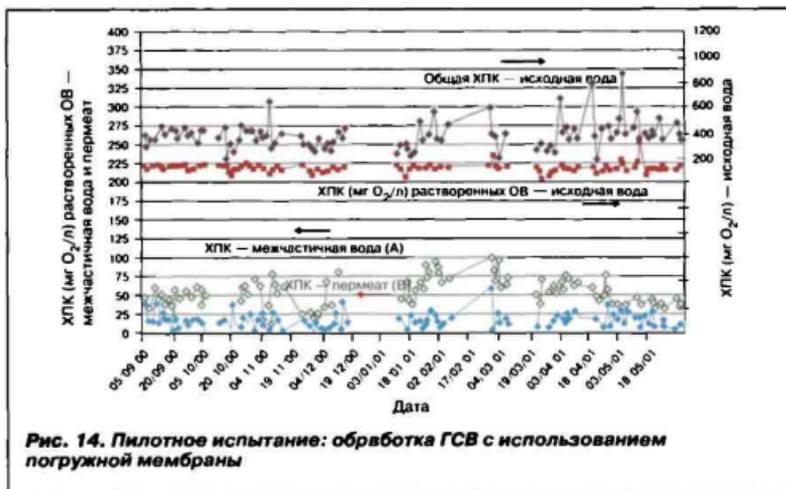
В мембранных биологических реакторах (БРМ — от фр. *bioreacteur a membrane*) используются минеральные мембраны осветления (с внутренней поверхностью фильтрации) или погружные органические мембраны (с внешней поверхностью фильтрации)

Выбор между этими двумя типами мембран делается в зависимости от их стоимости (более экономичными являются органические мембраны), их рабочего давления (предпочтительны керамические мембраны) и особенно от риска необратимого забивания, которое иногда приводит к разрушению органических мембран из-за того или иного компонента, содержащегося в сточной воде. пленкообразующие вещества, немзульгированные жиры, растворители и т. д. Однако риск необратимого забивания возникает достаточно редко и только для определенных видов ПСВ.

Мембранные биологические реакторы с погружными мембранами (**Ultrafor**) (см гл 11, п. 16) являются эффективным техническим решением для обработки ГСВ и даже для ПСВ пищевой или целлюлозно-бумажной промышленности. Они позволяют:

- обеспечить **безупречное качество воды**, что дает возможность ее сброса в особо чувствительные водоемы и даже позволяет повторно ее использовать (даже в тех случаях, когда необходимо обессоливание);
- проводить **реконструкцию/расширение очистных сооружений** с активным илом, особенно при ограниченных рабочих площадях. Действительно, изменяя концентрацию иловой смеси в процессе аэрирования, можно:
 - либо осуществлять режим **нитрификации**, хотя иловая смесь изначально предназначалась лишь для снижения БПК₅. В этом случае установка **Ultrafor** конкурирует с системами смешанных культур, но ее преимущество заключается в том, что она легко адаптируется к любой геометрической форме аэротенка,
 - либо при такой же массовой нагрузке обрабатывать **в 3 раза больший расход сточной воды**, добавляя (если необходимо, постепенно) модули в иловую смесь с растущей концентрацией.

Важным преимуществом является при этом возможность добиваться высоких результатов очистки без проведения дополнительных строительных работ (осветлители могут использоваться в других целях — в качестве накопителей на входе или выходе сооружения) при явном улучшении физических и бактериологических характеристик очищенной сточной воды, а также при снижении ХПК.



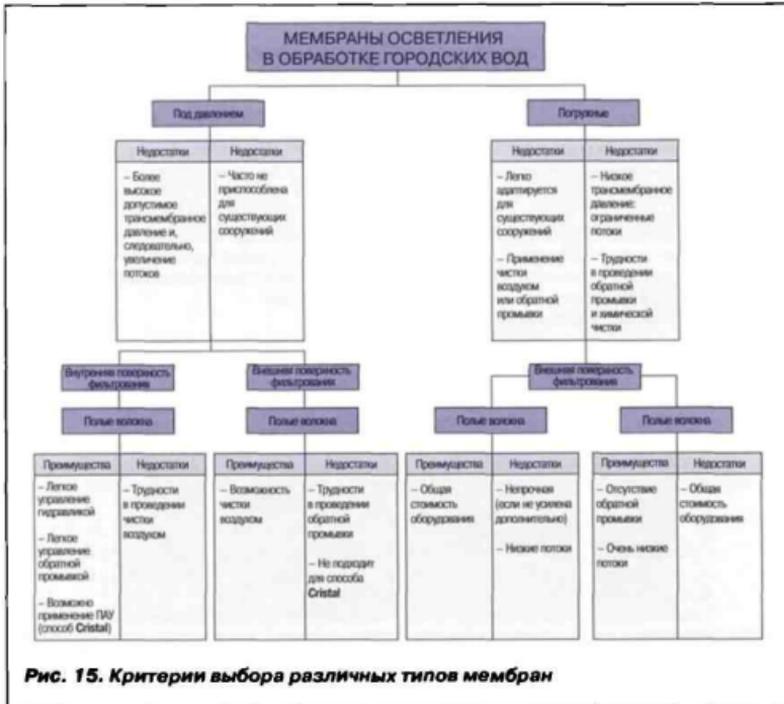


Рис. 15. Критерии выбора различных типов мембран

Эта роль мембран в отношении снижения ХПК продемонстрирована на рис. 14, где на примере обработки обычных ГСВ показана значительная качественная разница:

— между водой, полученной путем идеального отстаивания (в лабораторных условиях) биомассы, находившейся в равновесном состоянии в аэротенке (см. кривую А на рис. 14): ХПК от 25 до 100 мг/л со средним значением 70 (такие значения обычно получают после традиционного отстаивника);

— водой после отделения биомассы на мембране ультрафильтрации (см. кривую В на рис. 14): ХПК от 5 до 50 мг/л со средним значением 20.

Таким образом, выигрыш составляет 50 мг/л при более низкой дисперсии. Это объясняется тем, что неотстаивающиеся коллоидные вещества и макромолекулы задерживаются на мембране с помощью ультрафильтрации (поскольку время пребывания в системе таких коллоидов и макромолекул очень велико, они постепенно разлагаются)

Необходимо отметить, что на сооружениях биологической очистки, не требующих увеличения производительности, **добавление стадии ультрафильтрации в качестве «третьичной обработки»** позволяет улучшить качество получаемой воды, которое приближается к результатам работы установки *Ultrafor* при той же массовой нагрузке, но с несколько большими трансмембранными потоками.

На рис. 15 приведено несколько критериев выбора различных типов мембран, которые подтверждают вышеприведенные данные

4.2. Применение мембран обессоливания

4.2.1. Применение нанофльтрации

Как мы убедились, нанофльтрация позволяет:

- эффективно удалять ОБ (проход соли < 5 %), по крайней мере молекулы с молекулярным весом больше примерно 300 г/моль, которые представляют большую часть всех природных ОБ (такие вещества способствуют появлению цветности воды, тригалогенметанов и т. д. (см гл 2 и 22)), а также от 5 до 20 % применяемых пестицидов,
- проводить глубокое умягчение воды, особенно в присутствии сульфат-ионов, при этом содержание ионов Са и Mg в концентрате может достигать 98 %, но в таком случае возникает риск необходимости реминерализации пермеата перед подачей обработанной воды в сеть распределения;
- проводить частичное обессоливание

Таким образом, основное применение нанофльтрация находит в **обработке солоноватых вод, отличающихся жесткостью и высоким содержанием (от 1 до 6 г/л), а также иногда цветностью.** Прототипом нанофльтрации можно считать технологию обессоливания крупных подземных водоносных горизонтов во Флориде на установках производительностью более 300 000 м³/сут.

Примечание. В последнем случае вода проходила предварительную обработку декарбонатация, фльтрация, озонирование, а затем разбавление несолёными поверхностными водами

Модули разработаны так, что концентрат характеризуется:

- приемлемым уровнем ОБ;
- средним уровнем бивалентных ионов (проход соли по MgSO₄ — около 30 %),
- низким уровнем одновалентных ионов, что помогает избежать еще более глубокой деминерализации и так уже пресных вод

Такие модули целесообразно применять для доочистки мало минерализованных, но при этом окрашенных вод (см гл 22, п 17)

Недавно установки нанофльтрации стали применять для удаления сульфатов и магния, а также (в меньшей степени) кальция из морской воды, а именно:

- в системах вторичной закачки морской воды в пласты нефтяных месторождений. Их применение целесообразно в том случае, если присутствие Sr⁺ или Ba²⁺ в пластовых водах не позволяет вводить сульфаты из-за рисков быстрого забивания пор осадками сульфата бария или стронция, а также если ввод SO₄²⁻, способствуя повышенной активности бактерий, питающихся сульфатами, приводит к тому, что добываемое сырье обогащается серосодержащими веществами и провоцирует коррозию в газо- и нефтепроводах;
- при необходимости — в системах обессоливания морской воды с помощью многоступенчатой дистилляции мгновенного вскипания (MSF — от англ *multi-stage flash distillation*) (см. гл. 16, п. 4.5). Действительно, наиболее опасные отложения при дистилляции появляются с повышением температуры в виде карбоната кальция, а затем сульфата кальция и гидроксида магния. Предварительная обработка нанофльтрацией позволяет увеличивать температуру в начале технологической линии без риска образования отложений. Необходимо отметить, что разница между температурой на входе установки и температурой морской воды (холодного источника) влияет на качество получаемой с помощью установки воды,
- в системах двойной нанофльтрации для обессоливания морской воды, что, однако, предполагает разработку нового типа нанофльтрационных мембран

4.2.2. Обессоливание солоноватых вод

Как было отмечено (см. гл. 1 и 2), многие природные воды относятся к категории солоноватых

- подземные пластовые воды, контактирующие с соледержащими образованиями или испытывающие интрузию (внедрение) морской воды,
 - некоторые виды поверхностных вод, находящихся в прибрежных зонах
- Кроме того, многие ПСВ и/или ГСВ, подлежащие обработке или повторному использованию, также относятся к группе солоноватых вод

В любом случае в качестве предпочтительного метода обессоливания рекомендуется применять осмос, а ионный обмен — только для ограниченной группы вод с очень низким содержанием (меньше 200 мг/л), которые нужно полностью деминерализовать. Проведение электродиализа может быть целесообразным для



Фото 6. Установка для обессоливания солоноватых вод (от 1 до 6 г/л) (Эль-Атабал, Испания). Производительность 165 000 м³/сут

в некоторых малоконцентрированных солоноватых вод (< 1500 мг/л), нуждающихся в частичном обессоливании (минимум 80 % удаления соли) без удаления ОВ или патогенных организмов (см. гл. 3, п. 9.5.3).

В области обессоливания солоноватых вод мембраны низкого давления (от 5 до 15 бар) рекомендуются для обработки вод с содержанием меньше 5 г/л, предназначенных для производства питьевой воды. Мембраны среднего давления (от 15 до 30 бар) позволяют обрабатывать воду с концентрацией солей до 15 г/л, а также требующую глубокой деминерализации (прохода соли < 1 %).

Ключевой проблемой применения мембран при обессоливании солоноватых вод является адекватность предварительной обработки качеству исходной воды, которое иногда достаточно стабильно (например, подземные воды), но часто сильно изменяется (прибрежные или сточные воды). Только достоверное знание набора параметров, а именно

- содержание ВВ, коллоидных частиц,
- содержание различных солей или металлов, которые могут выпасть в осадок,
- концентрация и вид ОВ, которые могут загрязнять воду, и др.,

позволяет подать на осмотическую обработку после предварительной обработки воды приемлемого качества. Последняя может осуществляться с помощью любых технологий водоподготовки, включая биологическую обработку [дефериризация, удаление марганца, обработка в установках **Biofor** для удаления остаточной БПК или азота, что особенно целесообразно для технологических линий оборотного водоснабжения или повторного использования воды (см. гл. 23–25)].

Как говорилось в п. 3.1.3.3, чем выше заданное значение удельного расхода воды, тем выше должно быть качество предварительно обработанной воды. Таким образом, наибольшая нагрузка падает именно на первые стадии технологической линии сооружения. В результате на практике нередко случается, что величина удельного расхода в 2, а то и в 2,5 раза превышает среднее его значение. С учетом вышеизложенного целесообразным представляется использование так называемых устойчивых к заиливанию модулей, даже несмотря на их пониженную пропускную способность.

4.2.3. Обессоливание морской воды

На постоянно развивающемся рынке мембранных технологий обратный осмос, являющийся далеко не самой расточительной по энергозатратам технологией (табл. 8) и способный зачастую производить питьевую воду из морской только за один проход, становится все более и более конкурентоспособным по сравнению с технологиями термической дистилляции. Действительно, на сегодняшний день последние остаются эффективными только при обработке больших объемов воды (> 20 000 м³/сут) и при условии, что такие установки используют тепловую энергию низкой себестоимости, получаемую при низких температурах (давление от 1 до 3 бар) с помощью систем cogeneration электричество–вода (см. табл. 8).

4.2.3.1. Сравнение методов дистилляции и обратного осмоса

В странах, где получение энергии из первичных источников требует слишком больших финансовых затрат и новые электростанции не включают дистилляционные установки, а также там, где требуется обрабатывать воду с содержанием не более 41 г/л (Испания, острова Средиземного моря, Израиль, США, Карибы), установки обратного осмоса занимают практически 100 % рынка, так как капитальные затраты и эксплуатационные расходы в этом случае существенно снижаются.

Даже на рынке Среднего Востока, где до последнего времени лидирующее место занимали дистилляционные установки в сочетании с электростанциями, сейчас наблюдаются явный прорыв в практическом применении установок осмоса (рис. 16).

Таблица 8

Потребление энергии различными системами обессоливания морской воды (по данным работы А. Морель «Обессоливание морской воды и солоноватых вод» в части дистилляции)

Тип дистилляции	Энергия необходимая для производства 1 м ³ пар МДж - электроэнергия кВт · ч	Общее количество первичной энергии кг жидкого топлива ¹ , м ³	
		Установка с одной задачей ¹	Установка с двойной задачей
Многоступенчатая дистилляция мгновенного вскипания			
8 ступеней	293 + 4	9,2	3,7
10 ступеней	230 + 5	7,7	3,4
Выпарная дистилляция			
7 ступеней	376 + 2	10,4	4
10 ступеней	209 + 3	6,25	2,7
Технология выпаривания-компрессии	0 + 12 до 16	3-4	3-4
Выпарная дистилляция с эжекционной компрессией	334 + 1,5	9	3,3
Осмоз без рекуперации энергии	0 + 8	2	
Осмоз с рекуперацией энергии	0 + 4	1	

¹ 42 кДж жидкого топлива на 1 л воды или 10,5 МДж пара на 1 кВт · ч электроэнергии

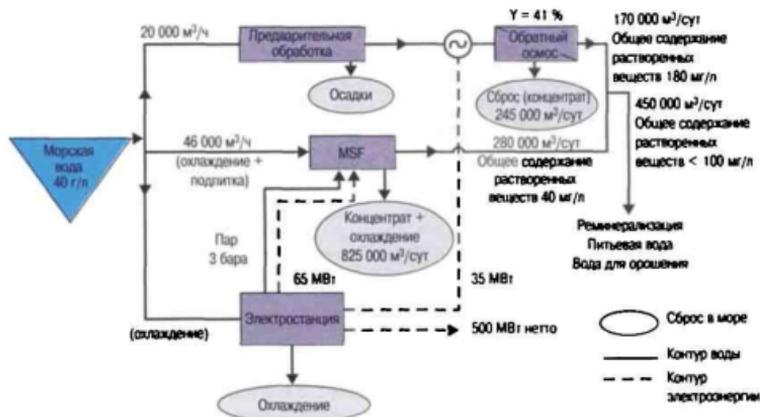


Рис. 16. Комбинированный комплекс обессоливания «Doogal» компании «Дегремон» в г. Фуджайра (Объединенные Арабские Эмираты) в номинальных условиях работы: 500 МВт чистой электрической мощности, 450 000 м³/сут производимой питьевой воды (37 % — обратным осмосом, 63 % — многоступенчатой дистилляцией мгновенного вскипания)

Действительно, сооружения дистилляции в сочетании с электростанцией имеют значительный недостаток — сложность регулирования, так как вода производится пропорционально потребности в электроэнергии, а потребности в электроэнергии и воде обычно не совпадают. Однако **комбинированные системы**, т. е. системы, объединяющие мембранные и термические технологии, позволяют

— в периоды низкой потребности в электрической энергии производить максимальное количество воды с помощью обратного осмоса, что поддерживает производство электроэнергии и, следовательно, позволяет удержать низкую ее себестоимость (табл. 9).

Таблица 9

Комбинированная система, включенная в схему теплостанции мощностью 600 МВт (пример комплекса в г. Фуджайра)

	Номинальные условия (лето)		Зимние условия	
	Производство воды, $10^3 \text{ м}^3/\text{сут}$	Внутреннее потребление электроэнергии, МВт	Вода, $10^3 \text{ м}^3/\text{сут}$	Внутреннее потребление электроэнергии, МВт
Обратный осмос	170 (37 %)	35	170	35
Многоступенчатая дистилляция мгновенного вскипания	280 (63 %)	65	170 ¹	39
Итого	450	100 Выработка нетто 500 МВт	340, т. е. 75 % от летнего уровня	74 Выработка нетто 286 ¹ МВт, т. е. 57 % от летнего уровня

¹ При работе теплостанции на 60 % от номинальной мощности

— в периоды высокой потребности в электрической энергии, особенно во время пиковых нагрузок, приостановить работу осмотической установки (воду можно накапливать предварительно, чтобы продолжать обеспечивать потребности в ней)

Многочисленные технико-экономические исследования показывают, что для нефтедобывающих стран оптимальное соотношение 1 м^3 воды, производимой термическим способом, к 1 м^3 воды, производимой обратным осмосом, варьируется от 30 : 70 до 70 : 30 в зависимости, в частности, от объема воды, которую необходимо получить на 1 МВт мощности источника электроэнергии, а также в зависимости от стоимости энергии

4.2.3.2. Проектирование установки обессоливания обратным осмосом

■ Водозабор

Возможны следующие варианты водозабора:

— **скважины в прибрежных зонах** или инфильтрационные штольни: представляют собой идеальный вариант для средних и малых установок ($< 20\,000 \text{ м}^3/\text{сут}$) в том случае, если хорошо известны местные геологические условия (первые 20–50 м). Часто необходимо провести разведочные работы и исследовать несколько опытных скважин, чтобы определить проницаемость водоносных слоев (количество и расположе-



Фото 7. Обессоливание морской воды обратным осмосом — на переднем плане вторая ступень, на втором плане — первая ступень (комплекс в г. Фуджайра, Объединенные Арабские Эмираты). Производительность 170 000 м³/сут

ние скважин, которых необходимо пробурить) и систему подпитки этих слоев (снабжение водой обеспечивается за счет морской воды или смесью морской воды с местными пресными водами) Для установок с более высокой производительностью необходимы слишком большие затраты на бурение скважин, их технического обслуживания и создание системы соединительных трубопроводов. — **водозабор из поверхностных источников** в этом случае необходимо предусмотреть, чтобы оголовки самотечных линий были расположены достаточно высоко от морского дна (< 4 м) для защиты от попадания песка, глины и крупных во-

дорослей, приносимых волнами, но при этом такие устройства должны располагаться **достаточно глубоко**, по возможности на расстоянии 5, а лучше 10 м от поверхности воды, чтобы ограничить (даже в случае «неспокойного» моря)

- попадание плавающих отходов, особенно углеводородов, которые могут появиться в результате дегазации в прибрежных зонах, в районах нефтяных платформ и т. д.
- работу в хорошо освещенных зонах, так как они оказываются наиболее благоприятными для размножения фито- и зоопланктона

Если водозаборные сооружения не удается расположить идеальным образом, необходимо предусмотреть установку очистки воды от песка, чтобы не допустить засорения и коррозии оборудования предварительной обработки, в так же систему ограждений для предотвращения забора плавающих загрязнений

Целесообразно провести тщательное исследование местных водных течений, чтобы разместить оголовки в месте, хорошо защищенном от разнообразных локальных загрязнений (вдали от портов, выбросов ГСВ и ПСВ), при этом нужно учесть необходимость сброса соледержащих концентратов от установки обессоливания

■ Предварительная обработка

В зависимости от нагрузки по ВВ (коллоидным) и их вида (или, мелкий песок или планктон) необходимо использовать предварительную обработку воды, чтобы тщательно удалить эти компоненты и, таким образом, получить предварительную обработанную воду с индексом забивания меньше 2,5, с пиковыми значениями, не превышающими 3–4. Учитывая, что соледержание не оказывает большого влияния на проведение процессов осветления, эту обработку можно проводить по аналогии с обработкой поверхностных вод (см. гл. 3, пп. 1, 3, 4 или 5).

В зависимости от типа водозабора можно предусмотреть следующие способы обработки воды

- при водозаборе из скважин, расположенных в прибрежных зонах, учитывая высокое качество воды, характерное для таких источников, можно ограничиться:
 - либо двумя последовательными картриджными фильтрами (обычно используются картриджи с 20 или 50 мкм, за которыми следуют картриджи от 5 до 1 мкм);
 - либо коагуляцией на фильтре с последующим фильтрующим картриджем 5 мкм — это решение подходит для случаев, когда есть основания опасаться присутствия мелкого песка или суспензий илов.

Примечание. Иногда вода, получаемая из глубоких скважин (> 30 м) и обладающая вликоловными физическими характеристиками (индекс забивания FI < 1), содержит H₂S (например, вода из водоносных слоев, обладающих восстановительными качествами) В этом случае очень важно не допустить попадания воздуха в сооружения (в головку скважины, в насосы), поскольку в противном случае окисление серы приведет к образованию труднокоагулируемой и «клейкой» коллоидной серы (H₂S, пройдя через мембрану, будет отгоняться с пермеатом).

- при водозаборе из поверхностных источников, учитывая качество воды, которое может быть очень разным в зависимости от места расположения водозабора, течений, образования планктона и наличия загрязнений, а именно
 - ВВ от < 1 до > 100 мг/л;
 - индекс забивания может изменяться от 2 до более чем 35 % за минуту,
 - содержание водорослей от 10 до 10⁵ клеток/мл,
 - содержание ООУ от 1 до 10 мг/л,
- можно предусмотреть следующие технологические линии обработки (в порядке увеличения сложности)

- **коагуляцию на фильтре при оптимальной величине рН** (часто в диапазоне от 6 до 7,2) Обычно для того, чтобы цикл был достаточно продолжительным, необходимо устанавливать двухслойный или трехслойный фильтр, что позволяет обеспечить достаточную продолжительность фильтроциклов (следует предусмотреть соответствующее время созревания хлопьев, в течение которого фильтрат должен идти на сброс — см гл 3, п 5 4 4). Использование напорного фильтра обеспечивает большую гибкость при выборе одного или нескольких коагулянтов,
- **коагуляцию и двухступенчатую фильтрацию**, что кроме прочего позволяет использовать на второй ступени более тонкие фильтрующие загрузки (< 0,3 мм),
- **коагуляцию-отстаивание с последующей двухступенчатой фильтрацией** (для наиболее сложных случаев, отработанных на сегодняшний день) Выбор осветлителя зависит от происхождения присутствующих ВВ, но обычно оптимальным решением является установка скоростной флотации **Rictor-AquaDaf** Действительно, такая установка представляет собой великолепный барьер для сырого планктона и пиковых нагрузок углеводородов (необходимо отметить, что по данным изготовителей мембраны имеют нулевую устойчивость к таким загрязнениям)

Как и для пресных вод, количество реагентов, оптимальная скорость фильтрации и продолжительность цикла зависят от природы присутствующих загрязнителей Для наиболее сложных случаев рекомендуется предусмотреть пилотные испытания (см примеры в гл 5, п 8) или в крайнем случае — тестирование воды на способность к обработке прямо на производственной площадке

В любом случае рекомендуется установить фильтр безопасности с картриджем 3 или 5 мкм

Кроме того, как было показано выше, мембраны осветления (непосредственно или с предшествующей коагуляцией) позволяют гарантировать безупречное качество воды по ее физическим характеристикам, и следовательно, обеспечить максимальный удельный расход и продолжительный срок службы осмотических мембран Таким образом, мембраны осветления обеспечивают отличную защиту от загрязнений, но при наличии в воде некоторых органических макромолекул всегда следует проверять эффективность работы этих мембран, а также контролировать срок их службы

Однако предварительной обработки, обеспечивающей низкий уровень индекса забивания (а такую обработку проводят в любом случае), может оказаться недостаточно, так как она не гарантирует отсутствия **биологического обрастания**, что зачастую представляет основную проблему, которую нужно решать с учетом следующих факторов

- эта проблема обычно не возникает при обработке воды из прибрежных скважин, если она не загрязняется в голове скважины, поскольку в этом случае вода содержит только незначительное количество бактерий, ОВ и питательных веществ;
- при классическом водозаборе обеззараживание воды (хлорирование в водозаборном сооружении, поддержание остаточного хлора во время предварительной обработки) является «палкой о двух концах» С одной стороны, хлорирование препятствует размножению моллюсков в водозаборных сооружениях (ракушек, мелких ракообразных и т. д.) и ограничивает размножение бактерий на фильтрующих поверхностях, с другой стороны, придает определенной части присутствующих в морской воде природных ОВ способность к биоразложению (особенно гумусовым кислотам, которые не поддаются этому в естественных условиях) Такая

возникающая в результате хлорирования биоразлагаемая фракция, сконцентрированная на поверхности мембраны, способствует быстрому образованию биопленки, особенно при повышенных температурах ($> 15^{\circ}\text{C}$).

В большинстве случаев вместо **предварительного окисления в непрерывном режиме** применяется **шоковое обеззараживание** (с последующим дехлорированием на входе в модули) с периодическим использованием (в случае необходимости) специальных бактерицидных реагентов для поддержания чистоты в модульных установках

Примечание При повышенной температуре воды требуется принять такие же меры перед обработкой на мембране осветления

Необходимо отметить целесообразность дополнительных мер борьбы с размножением бактерий, а именно

- периодическое использование хлорированной воды для промывки фильтрующих загрузок,
- промывка фильтров концентратом от осмотической установки, что производит осмотический шок с бактерицидным эффектом,
- промывка установки струей воды, прошедшей осмотическую обработку, что вызывает такой же бактерицидный эффект на уровне модулей (1 или 2 раза в неделю)

■ Блок осмоса

Такие системы обычно включают только один уровень ($Y = 35\text{--}50\%$), т. е. априори являются простыми и должны проектироваться с учетом содержания солей в исходной воде и рабочей температуры, а также следующих условий:

- все применяемое оборудование (насосы, трубопроводы, краны, инструменты) должно быть устойчивым к коррозии, вызываемой морской водой,
- при остановке системы (запрограммированной или нет) необходимо проводить промывку осмотической водой во избежание явлений прямого осмоса в модулях, а также в трубопроводах и вентилях, поскольку даже нержавеющая сталь корродирует в застойных зонах,
- каждый блок или группы блоков должны быть подсоединены к установке периодических химических чисток, которые необходимы в любом случае (частота таких чисток зависит в основном от эффективности предварительной обработки и от расхода обрабатываемой воды)

Химические чистки следует проводить по технологии, описанной в п. 3.1.3, в зависимости от следующих факторов:

- проницаемость мембраны (расход корректируется температурой и давлением),
- падение напора в модуле (а точнее, в модульном блоке из 6–8 элементов, установленных в одном корпусе);
- проход соли в установку

Обычно любое снижение проницаемости мембраны, превышающее 10–15 %, или увеличение потери напора (по сравнению с исходной ΔP) более чем на 20–30 %, а также возрастание расхода соли на 15–20 % вызывают необходимость проведения соответствующей промывки (чистки), в противном случае резко увеличивается риск необратимого снижения эффективности работы модулей. Необходимо отметить, что постоянный контроль работы установок требует применения высококачественного приборного оборудования, а также программного обеспечения, позволяющего стандартизировать результаты работы и соответствующим образом представлять их (в виде графиков и т. д.), что облегчает принятие правильных решений



Рис. 17. Обессоливание морской воды: две ступени с частичной обводной линией на второй ступени

Для обработки морской воды с очень высоким содержанием солей (> 40 г/л), а также в случаях когда необходимо добиться очень высокого качества получаемой воды (например, с общим содержанием растворенных веществ < 200 мг/л) или контролировать содержание отдельных веществ (например, бора с нормой менее 1, а иногда и 0,3 мг/л), следует применять двухуровневую последовательную линию производства воды. На втором уровне, часто называемом вторым проходом, состоящем из мембран низкого или среднего давления, осуществляется обработка пермеата первого уровня осмоса в соответствии с типовой схемой, приведенной ниже (рис. 17). Заметим, что концентрат второго уровня, соленое содержание в котором намного ниже, чем в морской воде, направляется в голову станции, таким образом, нет потерь воды и увеличения ее расхода на стадии предварительной обработки.

■ Специальный случай удаления бора

Осмотические мембраны предназначены только для удаления ионов. Однако, как показывает график (см. гл. 8, п. 3.2.5, рис. 28), при значениях pH ниже 9 и температуре 20°C борная кислота H_3BO_3 диссоциирует лишь в незначительной степени. Такая диссоциация зависит от температуры (снижается вместе с ней). Таким образом, при $\text{pH} \approx 7,5$ мембраны обессоливания морской воды удаляют только около 75–90% бора, а мембраны низкого давления второй ступени — 50–60%.

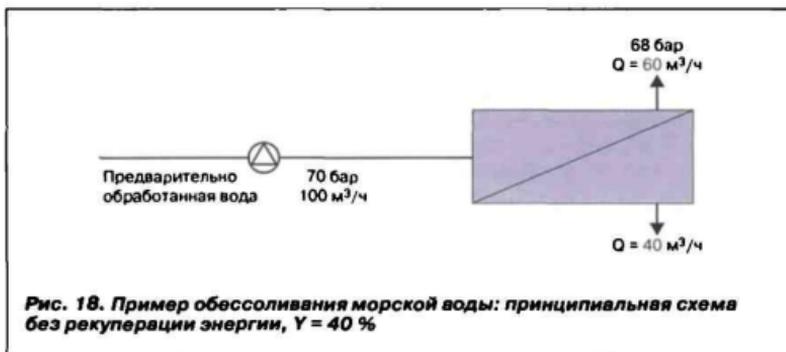
В целом, при температуре ниже 25°C для вод Атлантического океана и Средиземного моря с содержанием бора около 4,5–5 мг/л проведение одноступенчатого обессоливания является достаточным, чтобы обеспечить соблюдение европейских стандартов (на настоящий момент этот норматив составляет 1 мг/л). Но если требуется обессолить морскую воду с более высоким уровнем содержания (42–45 мг/л), что соответствует содержанию бора 5 мг/л, и при более высокой температуре (30 и даже 37°C в заливе), то для получения воды, соответствующей рекомендациям ВОЗ, необходимо не только использовать двухступенчатую систему (без байпаса), но и корректировать уровень pH на второй ступени очистки, доводя его до 10. В этом случае даже с учетом невысокой жесткости воды, получаемой на первой ступени ($\text{Ca} < 4$ мг/л, $\text{Mg} < 15$ мг/л), необходимо использовать специальные противосадочные реагенты (следует обращать внимание на высокое значение pH в концентрате: до 11), чтобы предупредить образование осадков CaCO_3 и Mg(OH)_2 (выбор и дозировка ингибитора определяют максимально возможный выход фильтрата на второй ступени).

В качестве альтернативного решения, известного на сегодняшний день, можно предложить фиксирование бора пермеата на специальной адсорбирующей смоле, регенерируемой щелочью и затем кислотой. Только тщательный экономический анализ каждого конкретного случая может помочь принять правильное решение: выбрать двухступенчатую обработку воды при повышенном уровне рН или предпочесть очистку с помощью адсорбирующей смолы, при этом в наиболее сложных случаях можно сочетать эти два варианта

■ Системы рекуперации энергии

При применении даже самой простой системы (рис. 18): высоконапорного насоса и мембранной одноуровневой установки с выходом фильтрата 40 % — удельное потребление электроэнергии остается очень высоким (около 6–7 кВт · ч на 1 м³ произведенной воды), при этом задвижка на сбросе концентрата должна пропускать 60 % потока исходной воды, входящего с давлением, равным входному, минус потери напора в модулях (от 1 до 2 бар)

Таким образом, идея использования концентрата для работы турбины в целях рекуперации его энергии возникла очень быстро, и в настоящее время такая методика является экономически целесообразной для любых размеров установки



Многочисленные системы рекуперации энергии, существующие в настоящее время, можно объединить в две большие группы

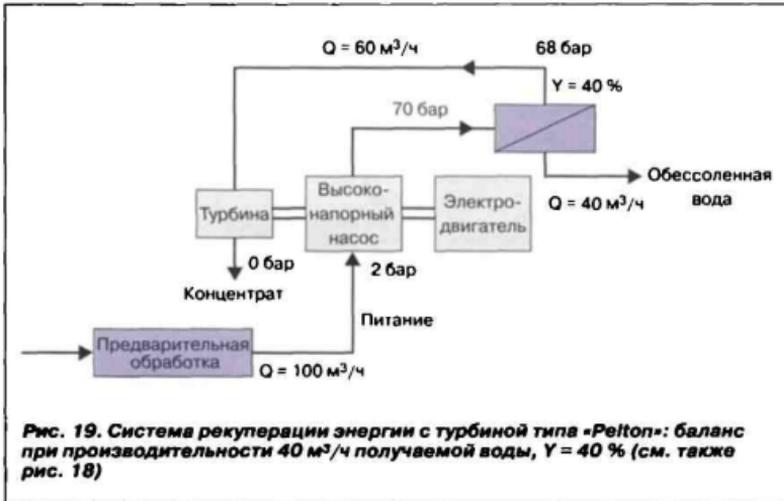
Турбина типа «Patton» рекуперировать энергию концентрата и использует ее повторно на валу высоконапорного насоса, что позволяет разгрузить двигатель с момента производства концентрата

Примечание. Процедуры запуска и автоматического останова должны прорабатываться вместе с проектировщиком.

При работе этой системы (рис. 19) потребление энергии в рассмотренном случае снизится на 3 кВт · ч на 1 м³, если выбранный высоконапорный насос имеет КПД выше 85 %, а система — только одну ступень обработки

Примечание. Другие, менее совершенные типы турбин не используются для работы на больших установках.

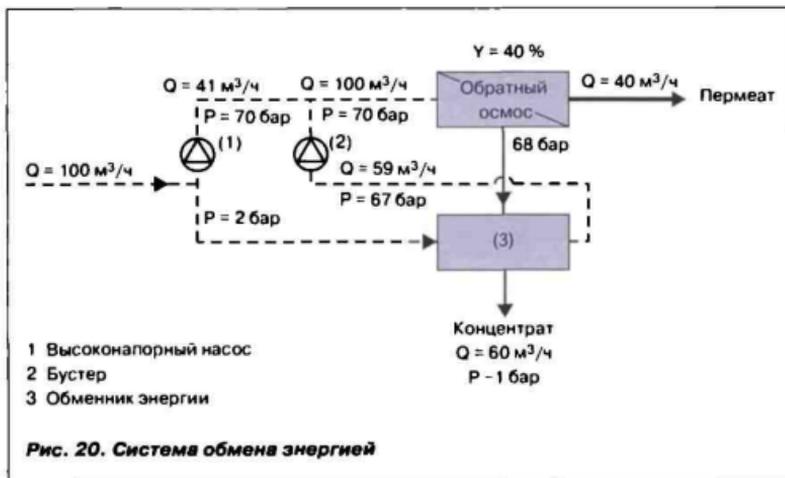
В этом случае весь комплекс установок данной системы (предварительная обработка, перекачивание насосами из моря, нагнетание полученной воды) будет потреблять около 4,0–4,5 кВт · ч на 1 м³



Система, называемая **системой обмена энергии** (англ. *work exchanger*) (рис. 20), рекуперировывает энергию концентрата, чтобы воздействовать непосредственно на такой же объем предварительно обработанной воды с помощью давления на несколько бар ниже давления подачи [из-за потерь давления в модулях и обменнике энергии (3)]. В этом случае высоконапорный насос (1) с точностью 1 или 2% (учитывая внутренние утечки в системе обмена) будет перекачивать только расход, равный



Фото 8. Установка «Турборотре» (г. Байя-де-Пальма) с турбиной «Pelton» с производительностью 700 м³/ч



расходу пермеата, т.е. в данном случае 41 м³/ч, что показано в примере на рис. 20. Насос-бустер (2) будет компенсировать потерю напора, о которой говорилось выше (3 бар). Такие системы (ротационные или линейные со свободным поршнем) имеют более высокий КПД (94–97 %) по сравнению с центробежными насосами. Удалось показать, что установка, работающая точно в соответствии с проектными



Фото 9. Ротационный обменник энергии. Станция «Dhekelia», фаза II (Кипр). 10 блоков РХ-220 с производительностью 10 000 м³/ч (обработка ПСВ)



Фото 10. Обменник энергии. Линейная система «Dweer» с производительностью 250 м³/ч (на первом плане — распределительная система установки «Dweer»)

параметрами на морской воде с солесодержанием 36 г/л, может потреблять не более 2 кВт·ч на 1 м³ получаемой воды

В целом выигрыш энергии по сравнению с турбиной «Pelton» составляет 0,5–0,8 кВт·ч/м³, и, таким образом, **общее потребление энергии** этими системами **составляет от 3,2 до 4 кВт·ч на 1 м³ получаемой воды**

Примечание При включении второй ступени обработки (100%) к вышеуказанным цифрам необходимо добавить 0,5 кВт·ч/м³ (энергопотребление второй ступени)



Глава

16

-
1. ВОЗДУШНЫЕ ИЛИ ГАЗОВЫЕ ДЕГАЗАТОРЫ, УСТАНОВКИ ДЛЯ УДАЛЕНИЯ CO_2 1071
 2. ИЗМЕРЕНИЕ ЗАПАХОВ И ДЕЗОДОРАЦИЯ 1075
 3. ТЕРМИЧЕСКИЕ ДЕГАЗАТОРЫ 1089
 4. ВЫПАРИВАТЕЛИ МОРСКОЙ ВОДЫ 1092
 5. ВЫПАРИВАТЕЛЬ КРИСТАЛЛИЗАТОР 1098

Дегазация, дезодорация, выпаривание

В данной главе описаны технологии обменных процессов газ – жидкость, применение которых существенно различается в зависимости от того, идет ли речь

- об удалении газов из воды отдувкой при обычной температуре **установка для удаления CO_2** или адсорбция газов в скруббере – в частности для удаления дурно пахнущих газов (**дезодорация**).
- об удалении кислорода отдувкой паром в **термических дегазаторах**, функционирующих при температуре, близкой к температуре кипения,
- о применении **выпаривателей-кристаллизаторов**, в дополнение к двум первым способам, для выпаривания воды, главным образом морской, в производстве **питьевой или технологической воды** – а также для концентрирования и даже кристаллизации солей сточных вод в целях предотвращения жидких выбросов в окружающую среду

1. Воздушные или газовые дегазаторы, установки для удаления CO_2

Основное назначение данных дегазаторов — удаление CO_2

- в производстве питьевой воды для повышения уровня pH и снижения агрессивности воды (см гл 3, п 13),
- в производстве промышленных вод после использования катионной смолы для уменьшения содесодержания и во избежание перегрузки анионных ионообменников (см гл 14),
- в обработке сточных вод для повышения уровня pH в биологических системах с высокой нагрузкой, например в случае применения чистого O_2 и т. д.

Ниже описаны только устройства с насадками. Однако в случае, когда требуется лишь частичное удаление растворенного CO_2 , процедуру можно осуществить с помощью (см гл 17, п 1).

- простого разбрызгивания,
- барботаж,
- механического диспергирования (каскады и т. д.).

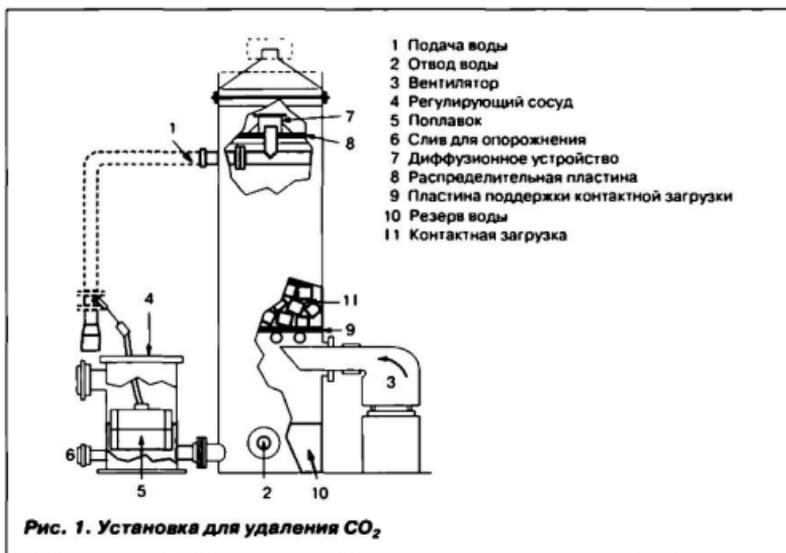
Все системы отдувки являются противоточными и функционируют в соответствии с законами массопередачи (см гл 3, п 14). Использование насадок позволяет за счет увеличения поверхности передачи добиться концентраций, близких к равновесным с одновременной минимизацией габаритных характеристик. Они также предусматривают.

- равномерное распределение воды по всей поверхности колонны (разбрызгиватель, перфорированный или тарельчатый распределитель),
- равномерное распределение газа в нижней части насадки, обычно через перфорированный несущий пол, решетку и т. д.
- обеспечение достаточной чистоты отдувающего газа во избежание побочных загрязнений (промывка газа водой)

Эти аппараты в зависимости от их основного применения называются установками для удаления CO_2 , воздушными или газовыми дегазаторами.

1.1. Установки для удаления CO_2

В данных установках (рис. 1) вода разбрызгивается или распыляется и равномерно распределяется над упорядоченной или неупорядоченной насадкой (состоящей из колец, хорд и др.) из пластмассы или другого нержавеющей материала. Воздух



подается вентилятором под перфорированную пластину, служащую опорой для насадки. Воздух и вода циркулируют противотоком. Дегазированная вода накапливается в резервуаре, расположенном под контактной колонной.

Как уже рассказывалось в гл. 3, п. 14, об обменных процессах газ-жидкость, остаточная концентрация CO₂ в жидкой фазе зависит от температуры, скорости потока воды, типа и объема насадки, а также от расхода воздуха.

Установки для удаления CO₂ компании «Дегремон» в зависимости от выбранного материала насадки обладают следующими основными характеристиками

- расход воды примерно 30–70 м³/ч на 1 м² поперечного сечения,
- расход воздуха примерно в 10–40 раз больше расхода воды,
- высота насадки 1,5–2,5 м.

С помощью правильно рассчитанной установки для удаления CO₂ можно получить остаточную концентрацию, очень близкую к равновесной (3–5 мг/л).

1.2. Воздушный дегазатор

По конструкции воздушный дегазатор аналогичен установке для удаления CO₂ и используется для удаления некоторых газов, растворенных в воде, таких как H₂S, и хлорированных растворителей.

Расходы воды и воздуха зависят от температуры обменных процессов газ-жидкость, от вида удаляемого газа или газов (константа Генри, начальная и конечная концентрации), от типа и от высоты насадки.



Фото 1. Установка в Нанжи (Сена-и-Марна, Франция) для компании «Seif» (группа «Огкет»). Расход 140 м³/ч. Установка для удаления CO₂, размещенная на сооружениях по обработке аммиачных конденсатов

1.3. Газовый и паровой дегазаторы

1.3.1. Газовый дегазатор

Когда использование воздуха невозможно (из-за его загрязненности или нежелательного присутствия кислорода), отдувающим может служить другой газ (инертный, природный), имеющийся в достаточном количестве

При бурении нефтяных скважин дегазаторы, в которых используется природный газ, применяются для удаления кислорода из воды, снова закачиваемой в скважины. Они функционируют под очень небольшим давлением, обеспечивая питание газового факела загрязненным газом

1.3.2. Паровой дегазатор

Если удаляемые газы хорошо растворимы (NH_3), дегазация при обычной температуре малозкономична. Процесс удаления более эффективен при высокой температуре, когда их растворимость уменьшается

Эта операция производится в **паровых дегазаторах** или **дистилляторах** (с обратным потоком), в которых пар выполняет двойную задачу: разогревает жидкую фазу и отдувает растворенные газы, подлежащие удалению



Фото 2. Установка в Эншова (Бразилия) для компании «Petrobras». Расход $2 \times 270 \text{ м}^3/\text{ч}$. Отдувка морской воды природным газом



Фото 3. Установка в Серенге (Бельгия) для компании «Cokerill-Sambre». Расход $30 \text{ м}^3/\text{ч}$. Дистилляция аммиачных вод коксохимического завода

Их основное назначение в обработке вод — удаление аммиака из выбросов от процесса газификации или коксохимического производства (фото 3). Обрабатываемая вода подается в головную часть колонны, а пар, циркулирующий прото-вотоком, — в основание. Контакт между жидкой и газовой фазами может обеспечи-ваться в системе пластин (тарелок) или контактной массе, распределяемой не-сколькими слоями. Из-за содержания аммиака в обрабатываемой воде часто тре-буется устраивать над зоной подачи воды дополнительную зону концентрирования аммиачных паров. По концентрации паров определяют их дальнейший способ об-работки (рекуперация или уничтожение).

Во всех случаях при создании подобных установок необходимо быть особенно осторожными как в подборе оборудования (коррозия, отложения смол), так и при запуске и эксплуатации установок (вредные газы, опасные вещества).

2. Измерение запахов и дезодорация

Соблюдение правил охраны окружающей природной среды обуславливает сис-тематический контроль за выбросом пахучих газов на сооружениях обработки го-родских или промышленных сточных вод. Подходящий для этого способ — сбор га-зовых выбросов, т. е. укрытие зон выбросов, а также их вентиляция, которая позво-ляет создать для персонала приемлемые условия на рабочем месте и направить эти газы на дезодорацию.

Но для решения вопросов дезодорации необходимо иметь возможность произ-вести измерение выделяемых запахов, определить зоны укрытия, уточнить приня-тые стандарты для окружающей среды и рабочих зон. Этот раздел посвящен всем перечисленным проблемам.

Наконец, одновременно с дезодорацией необходимо решать и другие проблемы охраны окружающей среды, такие как борьба с шумом, и даже заботиться об эсте-тическом виде сооружения (см. гл. 24, п. 1).

2.1. Источники эмиссии пахучих соединений на сооружениях очистки сточных вод

2.1.1. Ввод исходной сточной воды и предварительная обработка (очистка от песка, масел и первичное отстаивание)

Главная опасность таких сооружений состоит в возможности выброса в атмосфе-ру зловонных соединений, содержащихся в поступающих на обработку сточных во-дах. Их свойства и происхождение являются определяющими факторами, которые следует учитывать при оценке потенциального характера запаха (загниваемость, редокс-потенциал, температура, концентрация по БПК, протяженность сетей, про-межуточные насосные станции, наличие промышленных сбросов и т. д.). Можно предпринять меры по ограничению этих выбросов либо стараясь бороться с ана-эробными в сетях путем введения окислителя (например, H_2O_2), NO_3 (в условиях анокии и в неаэробных условиях), либо осаждая S^2 солями двух или трехвалент-ного железа.

Любое перемешивание (насосами подкачки, при взмучивании у основания реше-ток, барботажем в установках извлечения масел) будет способствовать отдувке серных и азотных летучих и крайне зловонных соединений, образующихся в резуль-

тате процессов анаэробной ферментации в канализационных сетях (разложение протеинов, образование меркаптанов и т. д.)

Отягчающим фактором является рециркуляция в головную часть очистных сооружений очень тяжелых и гнилостных потоков, образующихся при обработке осадков

На стадии первичного отстаивания эмиссия запахов ограничена (переливы в переливах) и измеренные концентрации оказываются ниже, чем концентрации на входе в очистные сооружения. Тем не менее накопители первичных осадков являются довольно сильными источниками запахов

2.1.2. Биологическая обработка и вторичный отстойник

Их вклад незначителен.

Концентрация серных соединений, измеренная у поверхности воды в аэротенках, всегда невелика. Если классифицировать установки по степени выделения вредных запахов в зависимости от способа обработки воды, получаем

- для режимов аэрации: маленькие пузыри < аэрация поверхности < большие пузыри (в порядке роста интенсивности дегазации),
- для режимов нагрузки: слабая < средняя < сильная (в зависимости от качества воды)

Вторичный отстойник практически не выделяет запахи при условии, что процесс обработки воды идет правильно. Точно так же как и возможная третичная обработка воды не создает особых проблем с эмиссией запахов

2.1.3. Обработка осадков

Вне всякого сомнения, именно на этом этапе находятся основные источники эмиссии пахучих соединений на очистных сооружениях

От применяемого способа обработки зависит интенсивность вредных выбросов:

- аэробная или анаэробная стабилизация осадков ограничивает выделение запахов,
- известкование воды изменяет перераспределение пахучих соединений: при увеличении уровня pH серные продукты блокируются в ионизированной (растворимой) форме в воде, тогда как азотные соединения высвобождаются.

В сгустителях существуют анаэробные зоны, и при ферментации в фазе ацидогена образуются летучие жирные кислоты

Таблица 1

Тип осадков	Центрифуга	Фильтр-пресс	Ленточный фильтр
Сброженные осадки	Слабая	Слабая	Средняя
Смешанные осадки после известкования	Слабая	Средняя	Средняя
Смешанные свежие осадки	Средняя	Высокая	Высокая
Термически кондиционированные осадки	Средняя	Высокая	Очень высокая

В табл. 1 показана зависимость эмиссии запахов от способа обезвоживания и природы осадков

На сегодняшний день либо весь комплекс очистных сооружений, либо, по крайней мере, основные зоны эмиссии запахов укрывают и оборудуют вентиляцией, а весь объем газовых потоков из этих помещений поступает в цех дезодорации (см. п. 2.6)

2.2. Основные загрязнения

За исключением крайне специфических случаев очистки промышленных сточных вод (ПСВ), пахучие соединения, выделяемые в системах обработки вод, можно объединить в четыре большие группы

- **серные восстановленные соединения**
 - сероводород H_2S ,
 - меркаптаны CH_3SH и т. д.,
 - органические сернистые соединения CH_3-S-CH_3 , $CH_3-S-S-CH_3$ (наиболее распространены) и т. д.,
- **азотные соединения**
 - аммиак NH_3 ,
 - амины CH_3NH_2 , $CH_3-NH-CH_3$ (наиболее распространены) и т. д.,
- **летучие жирные кислоты (ЛЖК)**
 - например, муравьиная и масляная кислоты,
- **альдегиды и кетоны.**

Серные восстановленные соединения и азотные соединения являются причиной самых сильных запахов на городских очистных сооружениях при отсутствии подключения ПСВ и термической обработки осадков. В последнем случае возможно выделение сильных запахов, связанных с альдегидами

2.3. Анализы

Существует два способа измерения запахов

— химический или физико-химический анализ, благодаря которому можно определить количество веществ (H_2S , CH_3SH , NH_3 и др.),

— органолептический анализ, основанный на остроте обоняния человека и позволяющий определить интенсивность запаха, вызывающего неприятные ощущения. Сопоставив эти измерения с моделями дисперсии, можно составить так называемую карту вредности

2.3.1. Химические анализы

Речь идет об определении содержания в загрязненном воздухе соединений по меньшей мере двух наиболее распространенных групп, а именно групп серных восстановленных соединений и азотных соединений (следует отметить, что для анализа содержания ЛЖК, альдегидов и кетонов применяются методики, подобные тем, что будут описаны ниже)

Для получения показательных результатов **важнейшее значение имеет отбор проб**

Для качественного анализа необходимо применять

- при определении содержания серных восстановленных соединений — хроматографию в газовой фазе, осуществляемую *in situ* (на месте),
- при определении содержания азотных соединений (а также ЛЖК, альдегидов и кетонов) — улавливание на твердом или жидком носителе с последующей де-

сорбцией и хроматографией в жидкой фазе высокого давления или газовой хроматографией + масс-спектрометрией в лаборатории (см гл 5, п. 3).

При выполнении хроматографии *in situ* после калибровки прибора эталонным газом трубку для забора можно вводить прямо в газовый поток и таким образом осуществлять подачу газа в хроматографическую колонну. Результаты, выраженные в $\text{мг}/\text{м}^3$ или $\text{мкг}/\text{м}^3$, представляют собой моментальные значения концентрации.

При выполнении улавливания на твердом или жидком носителе трубка для забора вводится прямо в газовый поток, всасываемый газ подается в систему улавливания (барботер или колонна с активированным углем или активированной окисью алюминия) через насос или счетчик.

Отобранные пробы отправляют в лабораторию для десорбции и анализа. Результаты представляют собой средние данные за время отбора (возможные пики концентраций во внимание не принимаются).

Наконец, для определения содержания серных восстановленных соединений при отсутствии переносного хроматографа можно произвести отбор проб в специальный пакет (из поливинилхлоридной пленки «Tedlar», материала, который не поглощает эти соединения), чтобы доставить их в лабораторию и выполнить газовую хроматографию загрязнителей. Необходимо соблюдать довольно строгие правила, которые приведены в стандартах NF EN 13725 и NF X 43-300.

2.3.2. Органолептический анализ

Знания количественного и качественного состава атмосферы недостаточно для определения пахучих свойств соединения (на уровне реакции обоняния человека) из-за синергических или, наоборот, маскирующих процессов. К тому же некоторые пахучие продукты ощутимы при столь низкой концентрации, что даже самые совершенные анализаторы не способны их выявить.

Органолептический метод основан на порогах восприятия запахов единственным имеющимся уловителем запахов, а именно обонятельной слизистой оболочкой носа человека, и предполагает два вида измерений:

- измерение **коэффициента разбавления запаха на пороге перцепции**, который во Франции представляется безразмерным числом и обозначается K50. В англоязычных странах это же число выражено в единицах запаха на кубический метр воздуха ($\text{OU}/\text{м}^3$),
- измерение **интенсивности запаха в среде**, сравниваемой с эталонной шкалой.

Оба измерения производятся посредством **статистической обработки устных ответов экспертной комиссии**, которой на изучение представляют пробы пахучей среды.

Чем многочисленнее состав комиссии, тем более воспроизводимы и достоверны измерения. Поэтому необходимо искать компромисс между стоимостью и надежностью результатов. Рекомендуется прибегать к помощи по меньшей мере

- 16 экспертов, когда требуется получить высокоточный результат;
- 8 экспертов в большинстве случаев.

Эксперты должны назначаться в зависимости от их индивидуального порога перцепции пяти чистых продуктов, представляющих большие классы пахучих соединений. По каждому из этих продуктов порог перцепции каждого эксперта должен находиться в пределах от 0,1 до 10 средних эталонных порогов.

Имеющий решающее значение процесс **отбора пахучей среды** описан в стандарте NF EN 13725. Этот стандарт также применим к измерению фактора разбавления запаха на пороге перцепции и к измерению интенсивности запаха.

2.3.2.1. Фактор разбавления запаха на пороге перцепции

■ Определение

Для каждого чистого вещества или пахучего соединения определяется пороговая концентрация

При этой концентрации 50 % экспертов, входящих в экспертную группу, воспринимают запах, а 50 % — нет. По определению концентрация пахучей смеси в таком случае равна порогу перцепции (K50).

■ Принцип измерения

Принцип измерения описывается в стандарте NF EN 13725

После того как пахучее соединение было разбавлено соответствующим газом без запаха, оно представляется экспертам комиссии, каждый из которых в отдельности указывает на то, ощущает он или не ощущает запах соединения. На основании нескольких последовательных проб определяется приблизительный уровень разбавления, для которого вероятность перцепции запаха равна 50 %.

Фактор разбавления выражается следующей формулой

$$K = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_2}$$

где Q_1 — расход газа без запаха, которым разбавляется расход пахучего газа Q_2

■ Оборудование

Ольфактометр — это прибор, который позволяет **контролировать разбавление** пахучего соединения газом без запаха и представить разбавленное соединение эксперту. Применяются только динамические ольфактометры. Уровень разбавления должен быстро варьироваться от 10 до 10 000. Прибор должен иметь три взаимозаменяемых канала: два — для газа без запаха и один — для тестируемого разбавленного газа. Рекомендуемая пропускная способность на выходе — $2 \text{ Нм}^3/\text{ч}$ (Нм^3 — кубический метр воздуха при нормальной температуре и давлении, т. е. при 0°C и 760 мм рт. ст.). Таким образом, ольфактометр не является измерительным прибором (эту функцию выполняет обоняние человека).

2.3.2.2. Измерение интенсивности запаха в среде

■ Определение

Интенсивность запаха в среде — это интенсивность восприятия. Она зависит от концентрации пахучего соединения в среде.

■ Принцип измерения

Интенсивность запаха указывается в произвольных единицах на основе психофизических измерений, произведенных комиссией экспертов, ответы которых подвергаются статистической обработке.

■ Методы измерения (см. стандарт Afnor NF X43-103)

Данный стандарт предусматривает использование эталонного интервала интенсивности, полученного на основе нескольких образцов, содержащих разбавленные растворы 1-бутанола или пиридина.

Измерение заключается в проведении сравнения обоняемого запаха с интенсивностью образцов эталонного интервала. Оно может осуществляться прямо в рассматриваемой среде. Члены комиссии выносят свое суждение конфиденциально. Результаты подвергаются статистической обработке.

По определению логарифм средней величины интенсивности запаха в среде равен среднему арифметическому N величин их логарифмов.

Вычисляется доверительный интервал данной величины. Если установленный уровень вероятности равен 0,95, значит, вероятность попадания истинного значения интенсивности в доверительный интервал составляет 95 %

2.3.2.3. Измерение запахов, выделяемых на сооружениях

■ Измерение эмиссии (поток запаха)

Поток запаха от источника по определению равен расходу воздуха разбавления, который снижает концентрацию пахучих газов в сточной воде и делает ее равной концентрации на пороге перцепции

Поток запаха ($\text{Нм}^3/\text{с}$) = $K50 \cdot \text{Расход выбрасываемого воздуха}$ ($\text{Нм}^3/\text{с}$)

Зная поток запаха источника, можно с помощью моделей атмосферной дисперсии определить сектор постоянного улавливания запаха, ограниченный пороговой дистанцией (дистанцией, при которой запах ощущается только в 50 % случаев)

Если поток запаха характеризует протяженность загрязненной зоны, то интенсивность запаха источника определяет уровень загрязненности по соседству с ним. Имеется два случая

- выбросы проходят через отводную трубу, прежде чем попадают в окружающую среду. В таком случае напрямую производится измерение $K50$ и интенсивности запаха источника,
- выбросы в воздух производит источник на поверхности, например отстойник. Согласно исследованиям эмиссия пропорциональна свободной поверхности бассейна. То есть берется определенный объем выброса с запахом и вводится в модель для измерения фактора разбавления на пороге перцепции ($K50$)

■ Измерения в окружающей среде

Такие измерения предназначены для количественной оценки — точной настолько, насколько это возможно — уровня запаха в данной зоне. Этот уровень измеряется при оценке интенсивности запаха, которую дает привлеченная группа наблюдателей

Любая фиксация интенсивности запаха комиссией дополняется сведениями относительно

- точного места перцепции,
- времени;
- продолжительности перцепции (продолжительность вдоха),
- качества запаха (например, промышленный запах, городской, сельскохозяйственный и т. д.)

Результаты обычно представляют в виде цветных карт (каждая — на определенных метеорологических условиях), на которые наносятся средние значения установленной интенсивности.

По этим измерениям судят о состоянии зоны, к примеру, до и после строительства завода или сооружения очистки сточных вод. Чтобы определить степень дискомфорта, который вызывает запах у жителей, проживающих по соседству

с объектом, можно прибегнуть к помощи волонтеров, выбранных из местного населения

Органолептические методы, основанные на физиологических реакциях группы экспертов, несомненно наиболее показательны в плане ощущений и возможного дискомфорта, испытываемых работниками объекта или проживающими поблизости людьми

Эти методы весьма дорогостоящи, если учесть число «экспертов-нюхачей», которое необходимо привлечь, и точность, требующуюся при их осуществлении. Следует также отметить, что не обсуждавшиеся здесь химические методы также представляют подлинный интерес, в частности для определения и проверки эффективности дезодорации

2.4. Вентиляция

2.4.1. Цели

Вентиляция на сооружении обработки воды может преследовать одну или несколько приведенных ниже целей

- контроль запахов,
- подача свежего воздуха для персонала, работающего в помещении, и, таким образом, соблюдение законодательства об атмосферном воздухе на рабочем месте,
- отвод загрязняющих веществ в систему дезодорации,
- предотвращение попадания загрязняющих атмосферу веществ, выделяемых при обработке, во внешнюю среду за счет создания вакуума в помещении (защита окружающей среды),
- **регулирование атмосферы в помещении**
 - осушение воздуха во избежание опасности конденсации и вытекающей отсюда проблемы коррозии,
 - обогрев помещения,
 - отвод тепла, выделяемого вращающимися устройствами, такими как компрессор воздуха, дизельные генераторы, электродвигатели и т. д.
- **удаление дыма** и обеспечение безопасности в случае пожара, в частности посредством разгораживания представляющих угрозу помещений

2.4.2. Типы вентиляции

2.4.2.1. Изолирование

Единственная цель изолирования — предотвратить попадание загрязняющих веществ во внешнюю среду. Здесь по-прежнему имеются в виду закрытые помещения, посещаемые только в исключительных случаях

Изолирование может быть обеспечено посредством защиты объекта непроницаемым покрытием без всякой вентиляции. В этом случае речь идет о **простом изолировании**. Систему защищенных или незащищенных вытяжных отверстий следует предусмотреть для обеспечения свободного изменения уровня воды

При производстве или введении газа, помимо изолирования, должен быть обеспечен забор газа с расходом, по меньшей мере равным расходу производства или введения.

Для улучшения изоляции можно прибегнуть к вытяжке путем создания разрежения относительно внешнего давления. В данном случае будет иметь место **изолирование с разрежением**

Примечание Изолированные помещения можно создавать внутри зданий, где обычно находится персонал. Тем самым их защищают от значительной части выделяемых загрязнений.

2.4.2.2. Естественная вентиляция

Циркуляция воздуха в помещении осуществляется за счет сделанных в стенах отверстий.

Конечно, этот простой и недорогой метод имеет множество недостатков

- невозможность защиты внешней окружающей среды от шума и загрязняющих веществ,
- сложность управления расходом воздуха (расход зависит, в частности, от ветра),
- сложность осуществления нормального обогрева в этих условиях.

Такой тип вентиляции рекомендован только для маленьких помещений (например, для трансформаторной будки).

2.4.2.3. Механическая вентиляция

■ Простая вытяжная вентиляция

Воздух поступает в помещение через отверстия, для этого предусмотренные, или проникает снаружи, зачастую случайно.

Пусть S — общая площадь отверстий (включая нежелательные), а Q — расход вытяжки. Предположим, что обратного попадания воздуха из внутреннего помещения наружу не происходит, если $V = Q/S > 2$ м/с и если атмосферные помехи умеренные (ветер слабый). Тогда разрежения, равного $0,7$ мм вод. ст., обычно достаточно для того, чтобы избежать попадания загрязняющего вещества из помещения наружу.

■ Недостатки

При простой вытяжной вентиляции нет движения воздушных масс в помещении. Поэтому гомогенизации атмосферы в помещении не происходит, что чревато образованием «мертвых зон», в которых концентрация загрязняющего вещества может быть гораздо выше вычисленного среднего значения. А это влечет за собой слишком большой расход вытяжки и соответствующую дезодорацию.

Однако для местной вентиляции это единственный способ улавливания загрязняющих веществ вблизи источника их возникновения. Он используется в изолированных помещениях, а также в тех случаях, когда оборудование — очаг значительных выбросов загрязняющих веществ — находится под вытяжным зонтом.

Образование «мертвых зон» под вытяжными зонтами неизбежно. Возможно увеличение в этих зонах точечных концентраций загрязняющих веществ, в два-пять раз превышающих среднюю их концентрацию в удаляемом воздухе, что грозит повышенной опасностью коррозии.

При установке вытяжных зонтов в здании скорость входа воздуха в них для нужд эксплуатации может быть снижена до $0,5$ м/с. Это вполне осуществимо, так как внутри здания нет внешних атмосферных помех.

■ Приточно-вытяжная вентиляция

Приточная вентиляция имеет большой радиус действия, она передает свою кинетическую энергию всему объему помещения и тем самым благоприятствует усреднению атмосферы. Кроме того, с притоком свежего воздуха в зоны циркуляции люди чувствуют себя более комфортно.

Расход притока должен определяться в соответствии с расходом вытяжки для поддержания сбалансированного разрежения в помещении. Для приточной вентиляции в отличие от вытяжной не требуется слишком большой расход вытяжки.

Возможно даже максимально ограничить расход произвольного притока воздуха, а следовательно, и поверхность притока (улучшить непроницаемость зданий).

2.5. Нормативно-правовое регулирование

2.5.1. О помещениях и вентиляции

Во Франции очистные сооружения отнесены к категории помещений со специфическими загрязнениями, -помещения, в которых опасные или вызывающие дискомфорт вещества выделяются в виде газа, паров, твердых или жидких аэрозолей и т. д. -

Для них определены две характерные величины

— предельные значения короткого экспонирования (*valeurs limites d'exposition a court terme — VLE*) — это предельные значения, измеряемые за период времени не более 15 мин. Их соблюдение предотвращает опасность мгновенного или кратковременного токсичного воздействия,

— предельные значения среднего экспонирования (*valeurs limites de moyenne d'exposition — VME*) — это предельные значения, измеряемые за период восьмичасового рабочего дня. Их соблюдение защищает работников от длительного токсичного воздействия. На короткие периоды времени VME могут превышать при условии, что не превышаются VLE, если таковые существуют. VLE, VME выражаются в объеме (ppm или частей на миллион), в массе, деленной на объем (мг/м³) или в объемном процентном содержании. При этом известно, что

$$\text{Значение, ppm} \frac{\text{Молярная масса}}{\text{Молярный объем}} = \text{Значение, мг/м}^3$$

и

Значение в процентном объемном содержании воздуха $10\,000 = \text{Значение, ppm}$ с молярным объемом, равным 24,45 л при 25 °C и при нормальном давлении.

Примечание. Кроме того, необходима установка устройств, предупреждающих о любой неполадке в системе улавливания.

Предельные значения устанавливаются для множества веществ, для одних они регламентируются, для других они рекомендуются (индикаторные).

В табл. 2 сравниваются французские VME и VLE со значениями, регламентированными в США, Германии и России.

2.5.2. Французское законодательство о запахах

В статье 2 французского закона от 30 декабря 1996 г. о воздухе и рациональном использовании энергии говорится: «Атмосферное загрязнение — это попадание вследствие прямых или косвенных действий человека в атмосферу или закрытое пространство веществ, представляющих угрозу для здоровья человека, наносящих вред биологическим ресурсам и экосистемам... наносящих чрезмерный вред обонятельному восприятию». Не давая определения максимальной обонятельной интенсивности, законодатель оставляет владельцам объекта право самим устанавливать свои требования.

Таблица 2

Вещество	VME, Франция		VLE, Франция		TWA (T), STEL (S), США	МАК, Германия	ГОСТ, Россия
	ppm	мг/м ³	ppm	мг/м ³	мг/м ³		
Сероводород H ₂ S	5	7	10	14	14 (T)	15	10
Метилмеркаптан CH ₃ -SH	0,5	1			0,98 (T)	1	0,8
Этилмеркаптан C ₂ H ₅ -SH	0,5	1			1,3 (T)	1	1
Аммиак NH ₃	25	18	50	36	17 (T) 24 (S)	35	20
Метиламин CH ₃ -NH ₂			1	12			
Этиламин C ₂ H ₅ -NH ₂	9,8	18	14,7	27	9,2 (T) 27,6 (S)	18	
Диметиламин (CH ₃) ₂ -NH			9,8	18	9,2 (T) 27,6 (S)	4	1
Триметиламин (CH ₃) ₃ -N			10,4	25	12 (T) 36 (S)		5
Хлор Cl ₂			1	3	1,5 (T) 2,9 (S)	1,5	

Примечание. Как и значения VME, значения МАК и TWA (time weighted average) помеченное (T) соответствуют среднему значению за 8 ч. Значения, помеченные (S) (STEL – short term exposure limit), равны средней концентрации за 15 мин и не должны превышать чаще, чем 4 раза в день с минимальным интервалом в 1 ч.

2.6. Дезодорация

Прежде чем приступить к обработке газовых выбросов, необходимо наметить ряд мероприятий, которые следует выполнять на сооружениях и непосредственно в канализационных коллекторах, чтобы **ограничить выделение запахов** (см. п. 2.1).

После решения этих вопросов можно рассмотреть три типа обработки для дезодорации воздуха на очистных сооружениях:

- физико-химическую,
- биологическую,
- обработку активированным углем.

2.6.1. Физико-химическая обработка в промывочной колонне Azurair C

2.6.1.1. Осуществляемые реакции

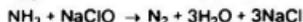
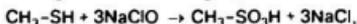
Речь идет о промывке газа в колонне с насадкой, обеспечивающей переход загрязнений в жидкую фазу, который сопровождается химической реакцией: кислотно-щелочной — в кислотной и щелочной колоннах; окислительно-восстановительной — в гипохлоритных (NaClO), тиосульфатных и бисульфитных колоннах.

В зависимости от характера смеси загрязняющих веществ, подвергающихся обработке, для их уничтожения необходимо использовать от одного до четырех реагентов, которые подаются в колонны по очереди

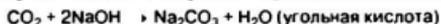
Промывка серной кислотой H_2SO_4 удаляет азотные соединения, в частности аммиак и амины



Окислительная промывка гипохлоритом натрия $NaClO$ удаляет серные восстановленные соединения, в частности сероводород, органические сернистые соединения, меркаптаны, а также аммиак и амины



Щелочная промывка содой $NaOH$ улавливает ЛЖК, серные восстановленные соединения и остаточный хлор. Она удаляет, в частности, карбоновые кислоты, сероводород, меркаптаны, но при этом частично и углерод CO_2 , который присутствует в воздухе, что следует учитывать при расходе реагентов



Восстанавливающая промывка бисульфитом $NaHSO_3$ или **тиосульфатом** $Na_2S_2O_3$ позволяет очистить выбросы от таких соединений, как ЛЖК, остаточный хлор, альдегиды и кетоны

Возможно комбинирование окислительной и щелочной промывки, но это сопряжено с увеличением количества используемых реагентов

В соответствии с вышеуказанными реакциями можно уничтожить плохо пахнущие соединения (например, H_2S окислением ClO^-) или, что происходит чаще, уловить их в циркулирующем растворе, который в связи с этим необходимо время от времени сливать и направлять в головную часть очистных сооружений.

2.6.1.2. Принципиальная схема работы колонны дезодорации (рис 2)

2.6.1.3. Циркуляция воздуха (см рис 2)

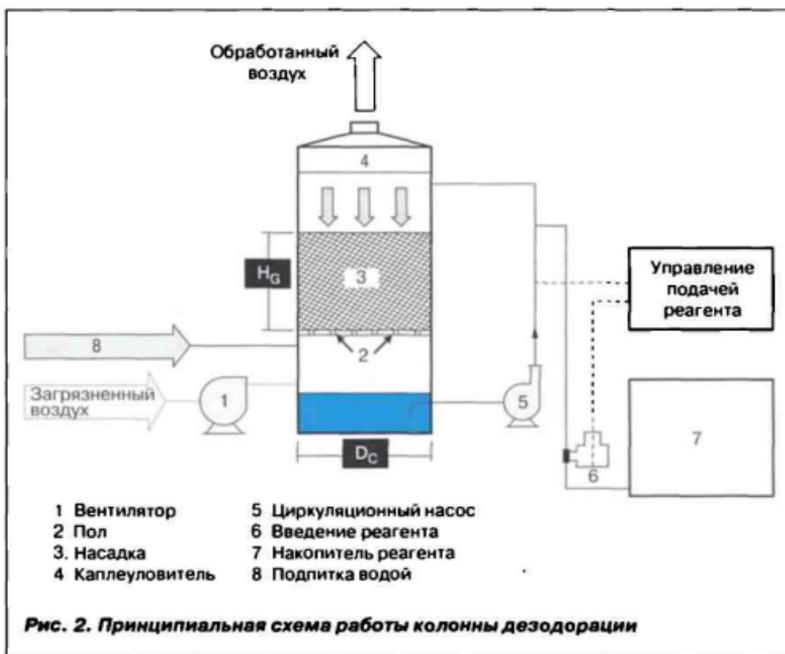
Загрязненный воздух из изолированного здания (или сооружения) вентилятором (1) направляется в колонну (или несколько колонн) под пол (2), несущий насадку (3), в которую подается реагент и внутри которой происходят абсорбция газовых соединений и описанные выше химические реакции.

Затем воздух из колонны попадает в каплеуловитель (4), который ограничивает вынос капелек, в частности при переходе от одной колонны к следующей

2.6.1.4. Циркуляция промывного раствора (см рис 2)

Промывной раствор с помощью центробежного циркуляционного насоса (5) подается из нижней части колонны в накопитель, затем поступает в распределительную систему (распределительную рампу или пульверизатор) над насадкой.

Расход циркуляции устанавливается в зависимости от расхода обрабатываемого воздуха в интервале между двумя пределами — минимальным для обеспечения



смачивания всей поверхности насадки и максимальным во избежание ее закупорки. При этом значения расхода зависят от выбранной насадки.

2.6.1.5. Регулирование подачи реагента

Концентрация реагента в промывочном растворе определяется.

- с помощью измерения уровня pH для кислотной, натриевой, гипохлоритно-натриевой и тиосульфатной колонны,
- с помощью измерения содержания свободного хлора для гипохлоритной и гипохлоритно-натриевой колонны,
- с помощью измерения редокс-потенциала для тиосульфатной колонны.

Расход поддерживается в интервале между двумя предельными значениями автоматическим введением реагента (6) из накопителя (7) (см рис 2)

2.6.1.6. Подпитка водой

Подпитка водой (8) необходима для того, чтобы по меньшей мере компенсировать испарение и подсос в виде аэрозолей, несмотря на работу каплеуловителя (4).

Для стандартных колонн подпитка происходит постоянно и рассчитывается так, чтобы вода в накопителе обновлялась еженедельно. Один раз в год необходимо опорожнять накопитель для чистки и контроля.

Если гидротиметрический титр ТН (общая жесткость) превышает 5 °F, подпиточная вода должна подвергаться умягчению

2.6.1.7. Расчетные параметры

Как говорилось выше, технологии очистки выбираются в зависимости от характера и количества содержащихся в выбросах загрязняющих веществ, а также от концентраций, которые требуется получить на выходе. При расчете размеров колонн необходимо также учитывать:

- тип выбранной насадки (неупорядоченная или упорядоченная, удельная поверхность и т. д.);
 - скорость воздуха в колоннах [максимальная — $2,1 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ в неупорядоченной насадке при нормальных температуре и давлении воздуха], от которой зависит диаметр колонны;
 - расход подачи промывочного раствора (стандартный расход — $2,5 \text{ л/м}^3$ в неупорядоченной насадке при нормальных температуре и давлении воздуха)
- Ввиду часто выдвигаемых требований повышенных гарантий компания «Дегремон» предлагает, как правило, последовательно соединить четыре вида колонн: кислотную, гипохлоритную, гипохлоритно-натриевую и тиосульфатную (Na).

2.6.2. Обработка активированным углем: способ Azurair A

Способ **Azurair A** рекомендуется для применения в установках с небольшими расходом и объемом загрязняющих веществ. Возможно также его использование для глубокой очистки после биологической обработки или промывки газа.

Принцип обработки заключается в том, чтобы привести в соприкосновение подвергающийся очистке воздух с массой гранулированного активированного угля (ГАУ), на поверхности которого происходит поглощение загрязняющих соединений. Для этой цели ГАУ подвергается специальной пропитке, что делает его менее чувствительным к влажности.

Диапазон температуры воздуха, необходимой для хорошей работы фильтра с ГАУ, — $5-60 \text{ }^\circ\text{C}$.

Основной параметр — **время контакта** от 2 до 3 с. Скорость потока, как правило, составляет $0,5 \text{ м/с}$, что позволяет не допустить слишком большой потери напора. Высота слоя угля обычно равна 1 м .

Адсорбционная способность зависит от адсорбируемых веществ, при этом следует избегать излишнего увлажнения активированного угля обрабатываемым газом. Если в воздухе содержатся частицы воды (туман) или есть опасность конденсации, воздух необходимо нагреть.

Рабочие характеристики активированного угля до наступления его насыщения очень хорошие.

- эффективность извлечения H_2S — около 99 % (при концентрациях выше 5 мг/м^3);
- возможность обработки в случае отдельных пиковых концентраций H_2S — вплоть до 100 мг/м^3 ;
- широкий спектр адсорбирующихся соединений, в частности летучих органических соединений, отдельные из которых трудно нейтрализовать другими средствами.

Возможно применение двухпоточной конструкции установки (рис. 3), что снижает размеры производственной площадки



Рис. 3. Двухпоточная концепция

2.6.3. Биологическая обработка: способ Azurair B

Биологическая обработка осуществляется в биофильтре с прикрепленными бактериями В установке **Azurair B** материалом для закрепления бактерий служит **Biolite**, который, однако, не затопливается, как в установке **Biofor**.

Принцип работы установки показан на рис 4

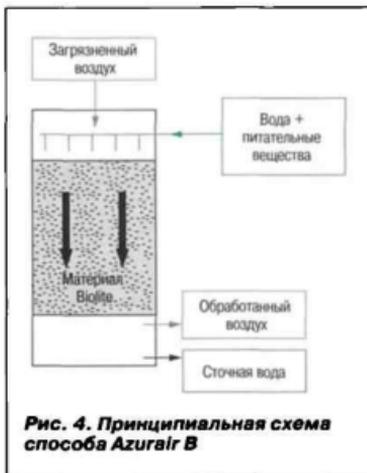


Рис. 4. Принципиальная схема способа Azurair B

Обрабатываемый воздух циркулирует сверху вниз с удельным расходом от 400 до 1200 м³/(м² · ч) в зависимости от исходной концентрации и требуемого остаточного содержания, вода разбрызгивается на загрузку (600 л на 1 м³ материала **Biolite** ежедневно), что позволяет поддерживать пленку бактерий влажной и обеспечивает подачу необходимых питательных веществ

Бактерии окисляют биоразлагаемые загрязняющие вещества, при этом сероводород трансформируется в серную кислоту и аммиак — в нитраты. Уровень pH сточной воды может опускаться до 1,5 в зависимости от нагрузки по сероводороду и блокировать другие биологические реакции. Сточные воды переправляются в головную часть очистных сооружений

Как и все биологические способы, данный способ чувствителен к колебаниям температуры, и для него характерен постепенный запуск. Минимально допустимые температуры.

- температура воздуха 10 °С,
- температура разбрызгиваемой воды 12 °С

В зависимости от нагрузки, а значит, от скорости бактериального роста может возникнуть необходимость в промывке, которая запускается в соответствии с потерей напора.

Однако для хорошо отлаженной установки при не очень большой нагрузке по загрязняющим веществам и при отсутствии источника углеродного загрязнения промывка применяется редко (одна промывка каждые 2–5 лет). И в таком случае достаточно осуществлять ее вручную.

Менее компактный и с более низкой эффективностью по сравнению с химическим, этот способ дезодорации используется обычно на небольших или средних сооружениях или при очень загрязненном воздухе для предварительной обработки запахов (с последующей очисткой активированным углем или химическим способом). В данном случае применение биологической обработки позволяет соблюсти крайне жесткие нормы выбросов или, что отмечается чаще, снизить расход реагентов (кислоты, гипохлорита, соды) и активированного угля.

Следует отметить, что существует множество фильтров, в которых применяются более грубые носители, такие как торф, компост, кора, но такие фильтры должны быть рассчитаны на скорость обработки в 3–5 раз ниже, чем у **Azurair B**. Кроме того, эти фильтры требуют регулярного осмотра во избежание их засорения, в связи с чем «Дегремон» отдает предпочтение фильтру **Azurair B**

2.6.4. Некоторые типичные результаты

Классическое очистное сооружение с дезодорацией в четырех колоннах кислотной, гипохлоритной, натриевой, тиосульфатной (Na) (табл. 3)

Таблица 3

	Дезодорация/вход, мг/м ³	Дезодорация/выход, мг/м ³
H ₂ S	2,1	< 0,02
CH ₃ SH	0,8	< 0,02
NH ₃	2,65	< 0,01
Амины (метиламин)	0,15	< 0,05
Пороговый фактор разбавления	4500	< 100

Классическое очистное сооружение с установкой **Azurair B** (биодезодорация на гранулированном материале) и окончательной очисткой активированным углем (табл. 4).

Таблица 4

	Ввод, мг/м ³	Выход после биообработки, мг/м ³	Выход после обработки на ГАУ, мг/м ³
H ₂ S	11	0,1	< 0,02
CH ₃ SH	2	0,8	< 0,02
NH ₃	6,5	0,12	< 0,01
Амины (метиламин)	0,4	0,095	< 0,05
Пороговый фактор разбавления	11 000	200	< 100

3. Термические дегазаторы

Паровая дегазация часто применяется для удаления кислорода и углекислого газа, растворенных в питательной воде паровых котлов.

Этот способ реализуется в термических дегазаторах, в которых поддерживаются необходимые для насыщения пара условия по давлению и температуре, при которых растворенные газы переходят в фазу пара и вместе с последним непрерывно выводятся наружу.

Паровые дегазаторы в зависимости от области их применения могут функционировать под давлением или со слабым вакуумом. В любом случае они отвечают условиям, требующимся для обменных процессов газ-жидкость:

- максимальная граница контакта вода–пар (насадка или пульверизация),
- поддержание температуры воды, очень близкой к температуре насыщенного пара под давлением дегазации,
- поддержание парциального давления удаляемого газа на нижней отметке по сравнению с давлением, соответствующим, согласно законам массообмена газ–жидкость, требуемому конечному содержанию,
- хорошее распределение жидкой и газовой фаз.

В зависимости от конструкции термические дегазаторы компании «Дегремон» подразделяются

- на дегазаторы со встроенным накопителем дегазационный резервуар;
- на дегазаторы с отделенным накопителем дегазатор с насадкой.

Эти установки должны быть оборудованы устройствами, обеспечивающими безопасность, а именно

- вакуумным клапаном, предотвращающим образование вакуума вследствие резкой конденсации пара,
- гидравлическим сифоном или клапаном(ами), в зависимости от давления дегазации, предотвращающим избыточное давление,
- сифоном или переливной трубкой, предотвращающими засорение.

3.1. Дегазационный резервуар

Дегазационный резервуар компании «Дегремон» спроектирован для работы при давлении от 0,3 бар и выше и предназначен для обработки холодной воды при расходе от 20 до 600 м³/ч

В этой горизонтальной установке три отсека (рис. 5):

- отсек нагрева (1), расположенный под пульверизатором, в котором вода нагревается паром, поступающим из бойлера через щель между перегородками (4),
- бойлерный отсек (2), где пар эффективно распределяется через систему разделителей. Вода попадает в бойлер через калиброванные отверстия (3) благодаря естественной циркуляции, создаваемой разницей объемной массы жидкой фазы между двумя отсеками: нагрева (вода + конденсированный пар) и бойлерным (двухфазная среда — вода и пар);
- отсек дегазированной воды (10), наполняемый этой водой при переполнении бойлера.

Воздух и пар поступают в дегазационный резервуар через регулирующие вентили (7) и (8), которые приводятся в действие в зависимости от уровня воды в установке и от давления паровой фазы в резервуаре.

Эта установка способна принимать изменяющиеся расходы воды (с увеличением до 5 раз в зависимости от условий применения) и получать дегазированную воду с очень небольшой концентрацией (от 10 мкг/л и ниже).

3.2. Дегазатор с насадкой

Дегазатор с насадкой (рис. 6) обычно устанавливается на бак-накопитель, с которым он соединяется трубопроводом для дегазированной воды и выравнивания давления (6).

Вода, разбрызгиваемая над насадкой, стекает навстречу пару на контактную загрузку, состоящую, как правило, из металлических колец из нержавеющей стали

Эта установка прекрасно выдерживает смену режимов и частый запуск

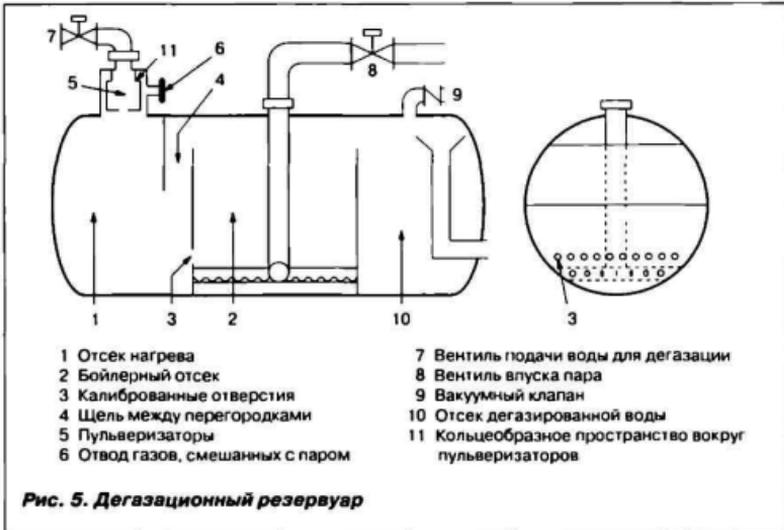


Рис. 5. Дегазационный резервуар

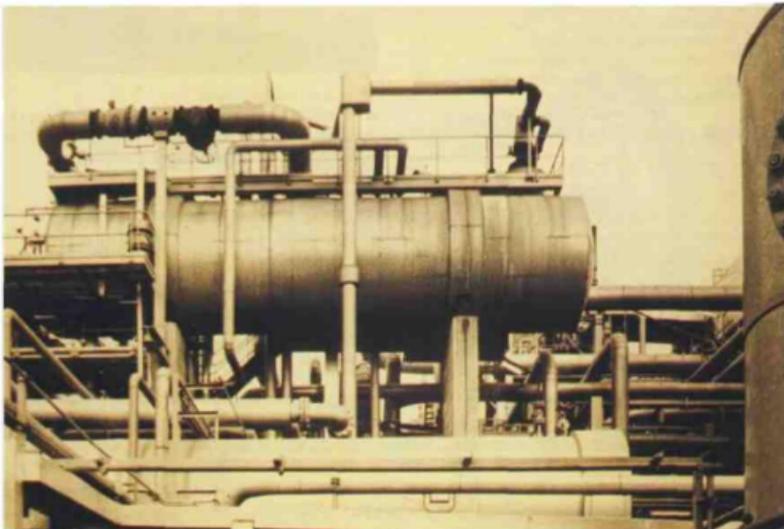


Фото 4. Установка на заводе полихимического производства в Бедрийф Беек (Нидерланды) компании «DSM» («Dutch Staat Smijpen»). Расход 255 м³/ч. Дегазационный резервуар

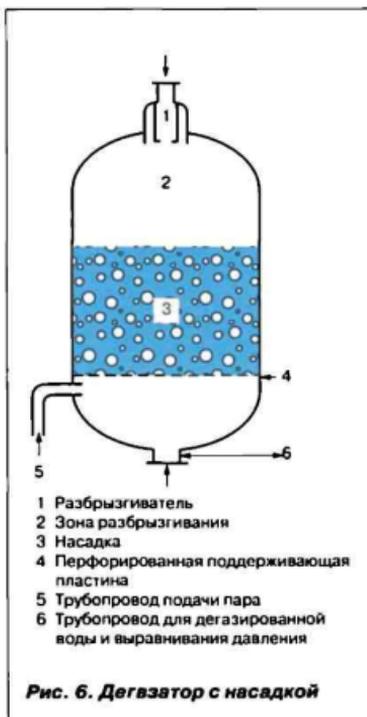


Фото 5. Установка в Париж-ля-Вильетт (Сена, Франция) для компании «СРСУ». Расход 120 т/ч. Дегазатор с насадкой

Благодаря своей компактности за счет высокоразвитой границы контакта вода – пар и возможности приспособлять насадку к новым условиям работы дегазаторы с насадкой могут заменить дегазационные резервуары

4. Выпариватели морской воды

Дистилляция по-прежнему конкурирует с обратным осмосом морской воды (см гл 15, п 4), и, хотя она потеряла рынок обработки солоноватых вод, она все же применяется во многих промышленных процессах в широком диапазоне концентраций. В последнее время экологические ограничения заставляют экономить ресурсы воды хорошего качества, подталкивая тем самым к созданию систем с максимально высоким уровнем рециркуляции, даже замкнутых систем **без жидких выбросов**, и снова ставят методы дистилляции в один ряд с другими методами обработки вод Действительно, только выпаривание в совокупности с кристаллизацией позволяет удалить наиболее растворимые соли (например, NaCl, Na₂SO₄) в виде твердых кристаллов (см п 5)

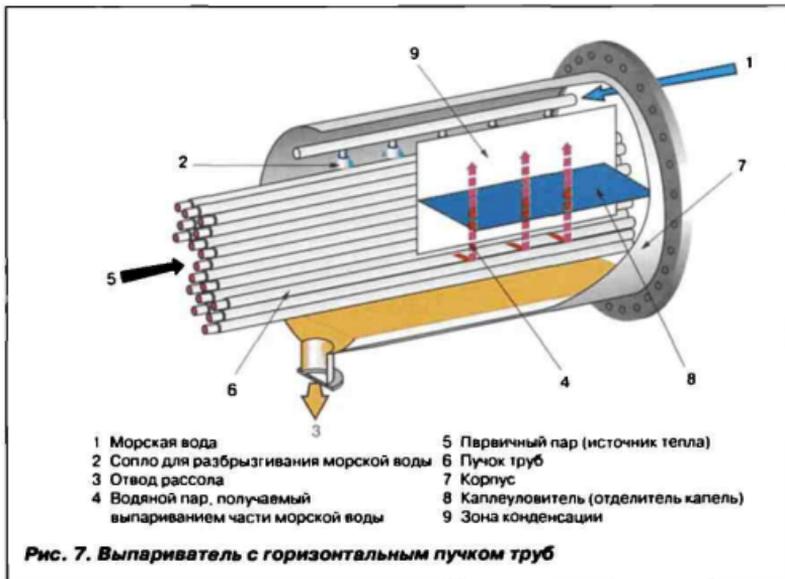
4.1. Общие положения

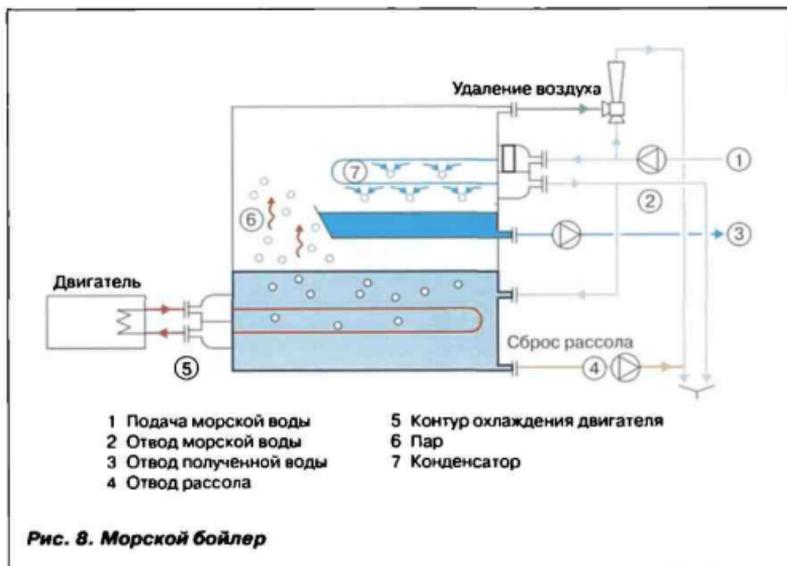
Дистилляция — самый старый способ, используемый для получения обессоленной воды из морской или солоноватой воды. Этот метод основан на принципе естественного цикла: тепло, распространяющееся над поверхностью океанов, вызывает испарение воды, переходящей в пар, преобразующийся в облака. Достигнув более холодных атмосферных слоев, облака конденсируются и снова выпадают на землю в виде дождевой воды, в которой не содержится соль.

На основе этого цикла были созданы промышленные установки: источник высокой температуры — для выпаривания и источник низкой температуры — для конденсации, какой бы ни была соленость исходной воды, получаемая вода имеет очень высокое качество. Конечное солесодержание обычно не превышает 10 мг/л, некоторые технологии отделения капель рассола, попадающих в пар (каплеуловители), позволяют добиться даже значений менее 1 мг/л.

Необходимую энергию можно обеспечить за счет контура горячей воды, пара или электрического источника. Получение обессоленной воды происходит путем конденсации вторичного пара на трубах, охлаждаемых морской водой (кроме случая механической компрессии, рассматриваемого в п. 4.6).

И хотя для обессоливания морской воды предлагается множество видов выпаривателей (с вертикальными трубами, с пластинами, с восходящим или нисходящим потоком), основным используемым сегодня техническим средством остается **выпариватель с горизонтальными трубами**. Нагреваемые изнутри трубы орошают-





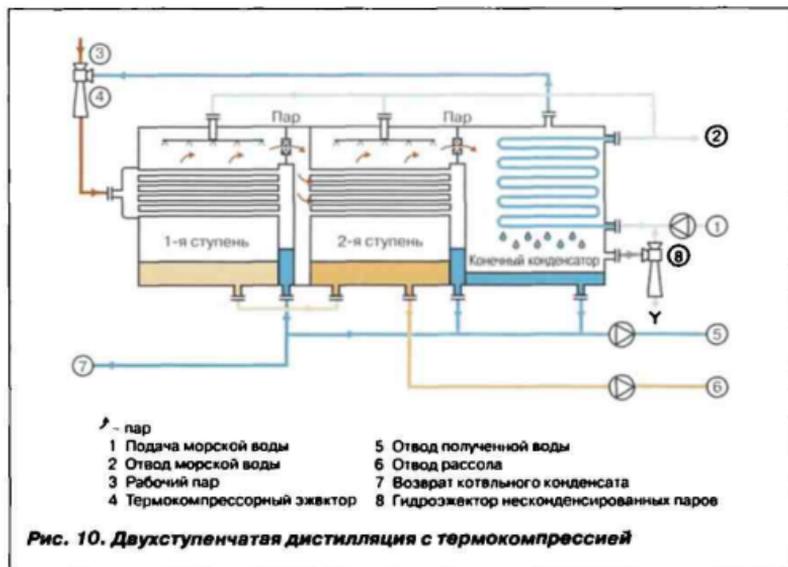
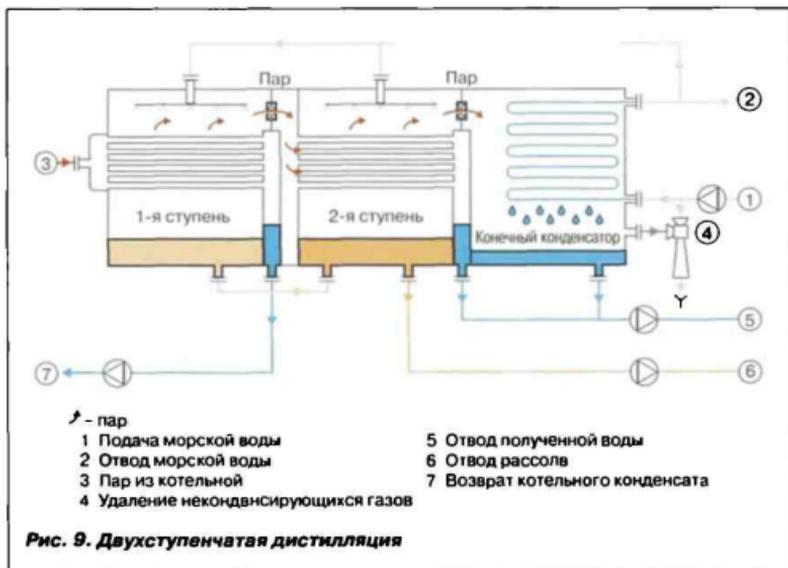
ся морской водой (рис 7), вода выпаривается на поверхности труб, а образующийся при этом пар направляется в конденсатор

4.2. Морской бойлер

Первым промышленным выпаривателем морской воды дали название -бойлеры (рис 8) С помощью бойлеров получают питьевую воду на судах, при этом источником тепла служит тепло, выделяемое одним или несколькими дизельными двигателями, источником холода — сама морская вода Так как свободная энергия имеется в избыточном количестве, оптимизация ее потребления не стала приоритетом, и нередко можно найти бойлеры, потребляющие 700 кВт·ч на 1 м³ выпаренной воды Чтобы ограничить отложение накипи и увеличить срок эксплуатации оборудования, были предложены вакуумные бойлеры для понижения температуры выпаривания (между 60 и 70 °С)

4.3. Многоступенчатая дистилляция

Для повышения коэффициента полезного действия КПД (GOR — от англ *global output ratio* — общий коэффициент полезного действия отношение количества получаемой дистиллированной воды к количеству пара, выраженное в 1 кг полученной воды на 1 кг использованного пара) и, следовательно, для понижения стоимости производства пресной воды тепло, выделяющееся при конденсации пара на первой ступени, используется в колонне нагрева выпаривателя второй ступени, а тепло, выделяющееся при конденсации пара на второй ступени, используется в колонне нагрева выпаривателя третьей ступени и т. д. Такое повторное применение получаемого



го пара возможно только с понижением рабочего давления на каждой последующей ступени, так что последний конденсатор работает при самом низком давлении. Данная технология получила название многоступенчатой дистилляции (MED — от англ *multi-effects distillation* — рис 9)

Увеличение количества ступеней повышает общий КПД, так как одно и то же количество первичного пара из котельной используется более эффективно и производит значительно больше воды, но требует расширения котельного производства. Поэтому необходимо искать оптимальный с экономической точки зрения вариант, учитывая в первую очередь стоимость местной энергии

4.4. Многоступенчатая дистилляция с термокомпрессией пара

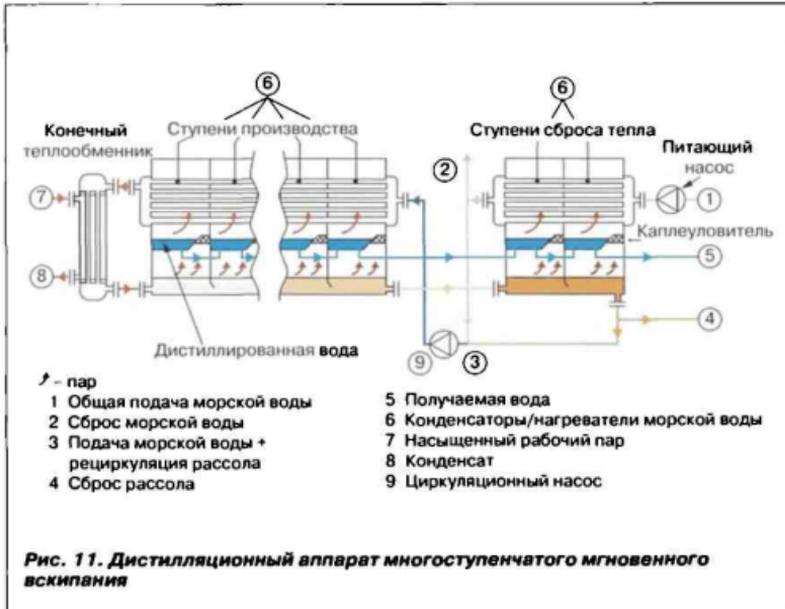
Для еще большего повышения КПД можно использовать термокомпрессию (рис 10) — смешивание части пара последней ступени с рабочим паром при помощи термокомпрессора (рабочее давление должно быть выше 3 бар абс). Смешивание пара низкого давления с первичным паром дает более значительное количество пара с промежуточным давлением и температурой. На практике эта система, называемая многоступенчатой дистилляцией с термокомпрессией пара (MED-TCV, TCV — от фр *thermocompression vapeur*), позволяет увеличить КПД вдвое

В последние годы эта технология постепенно вытесняет технологию многоступенчатого мгновенного вскипания, так как позволяет одновременно снизить капиталовложения и стоимость производимой воды. Удельное потребление энергии на установке такого типа может быть ниже 70 ккал/кг производимой воды, а разница температуры при переходе от одной ступени к другой варьируется от 4 до 10 °С. Многоступенчатая дистилляция с термокомпрессией позволяет строить установки с единичной производительностью до 22 000 м³/сут.

4.5. Дистилляционный аппарат многоступенчатого мгновенного вскипания с рециркуляцией

В дистилляционном аппарате многоступенчатого мгновенного вскипания (MSF — от англ *multi-stage flash distillation* — рис. 11) циркуляционным насосом (9) к пучку трубчатых конденсаторов подводится противотоком морская вода, которая постепенно нагревается за счет повторного использования на каждой ступени (6) тепла конденсации. Последняя ступень нагрева обеспечивается посредством конденсации первичного пара через конечный теплообменник. Как только морская вода нагревается до температуры, близкой к 110 °С (максимальная температура), она перетекает из отсека в отсек, при этом происходит падение давления (каждый отсек или ступень работает при все более низком давлении), высвобождая накопленную энергию в форме сконденсированного пара. При контакте с внешними холодными поверхностями пучков конденсаторов сконденсированный пар передает энергию конденсации морской воде, которая циркулирует внутри труб и преобразуется в дистиллированную воду

Эта технология была популярна на протяжении нескольких десятилетий, начиная с 1960-х гг. Главное преимущество метода заключается в упразднении поверхностного обмена на уровне выпаривания, что уменьшает на 2 °С потерю температуры при переходе от одной ступени к другой. В результате можно смонтировать до 30 последовательных отсеков и достичь удельного потребления энергии порядка 80 ккал/кг

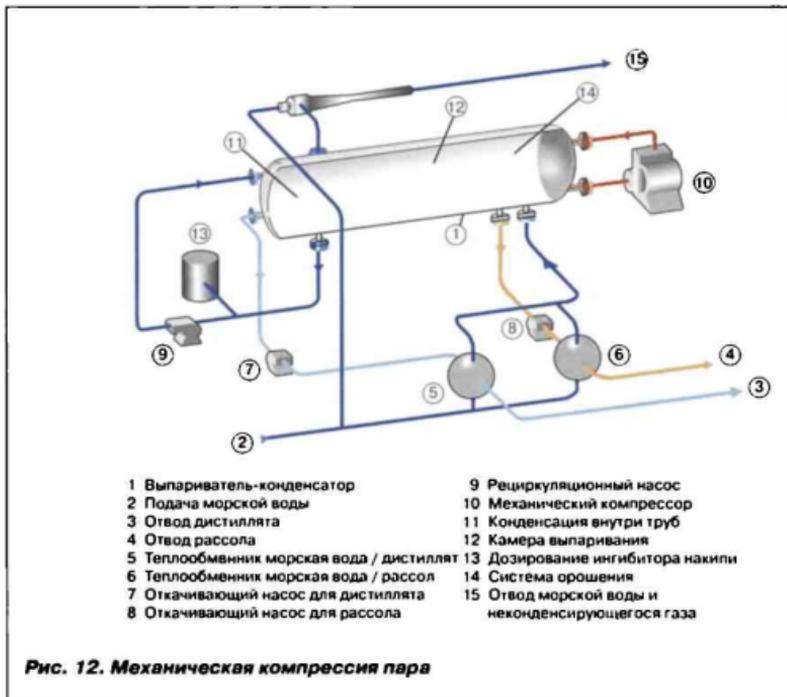


дистиллированной воды. Однако следует учитывать, что только рециркуляционные (9) и охладительные (1) насосы расходуют от 2 до 3 кВт · ч на 1 м³ дистиллированной воды.

Технология многоступенчатого мгновенного вскипания позволяет создавать установки с единичной производительностью до 78 000 м³/сут. Все крупные подобные установки спарены с теплостанциями в целях использования всего пара, выходящего из турбин низкого давления (от 2 до 3 бар), или его части (см. также гл. 15, п. 4.2.3).

4.6. Механическая компрессия пара

Технология механической компрессии пара (CMV — от фр. *compression mécanique de vapeur* — рис. 12) часто используется, когда единственным источником энергии на площадке является электричество. Единичная производительность варьируется от 20 до 2500 м³/сут. За счет компрессии сконденсированного пара система получает требуемую энергию. Давления около 200 мбар хватает, так как оно соответствует повышению температуры сконденсированного пара (без смены фазы) и обеспечивает достаточный перепад температур Δt для выпаривания. Для запуска нужно создать первичный сконденсированный пар с помощью электронагревательных элементов. Для уменьшения расхода электричества в двух пластинчатых теплообменниках накапливается тепло перед отводом дистиллята и рассола. Потребление электроэнергии при использовании данного типа системы варьируется от 8 до 25 кВт · ч на 1 м³ выпаренной воды в зависимости от размера установки.



Вакуум создается с помощью гидроэжектора, который работает на морской воде под давлением или в автономном контуре

5. Выпариватель-кристаллизатор

О различных способах кристаллизации соли или сахара известно с давних времен, однако лучшее понимание механизмов кристаллизации (формирование зародышей кристаллов — рост кристаллов) и появление соответствующего приборного оборудования (денсиметр, кондуктометр и др.) позволили несколько десятков лет назад создать непрерывно работающие установки.

Цель технологии выпаривания-кристаллизации — получить кривую растворимости вещества, чтобы выделить вещество в процессе выпаривания или посредством охлаждения раствора до эвтектической точки. При непрерывном процессе кристаллы удаляются по мере их образования с помощью специального устройства (центрифуги, фильтра и т. д.). В обработке вод используется только выпаривание.

Одно из главных преимуществ технологии выпаривания-кристаллизации состоит в возможности получить конечный продукт высокой чистоты (кристаллы и/или конденсат). При выпаривании возможно применение различных способов в зависи-

мости от требуемого конечного размера кристаллов и/или доступного источника энергии (пар, механическая компрессия пара, термокомпрессия пара)

5.1. Нулевой жидкий сброс

Все больше производителей ищут технологии, которые предотвратили бы жидкие сбросы в окружающую среду. Решение этой проблемы продиктовано необходимостью соблюдать законодательные ограничения, а также стремлением избежать затрат времени и трудностей, связанных с получением права на сбросы, и, наконец, продемонстрировать свое абсолютное уважение к окружающей среде. В этих случаях применение технологии выпаривания-кристаллизации становится необходимым. Действительно, только эта технология позволяет получить дистиллированную воду для повторного использования и выделить соль в твердом виде, также иногда годную к полезному использованию (см. пример ниже), но чаще всего отправляемую в минимальном объеме на специальное захоронение.

5.2. Пример: использование барды дрожжевого завода

Сырьем для дрожжевых заводов часто служит патока-меласса с сахарного завода; производство дрожжей влечет за собой большое количество жидких сбросов (барды). В обездрожженной барде еще содержатся коммерчески полезные вещества, в связи с чем для обработки этой жидкости были созданы различные технологии. В большинстве случаев предусматривалось концентрирование барды с последующим выделением калия посредством кристаллизации сульфата калия. При этом прибегают к выпариванию с вводом добавки, способствующей кристал-



Рис. 13. Выпариватель-кристаллизатор: утилизация барды дрожжевого производства

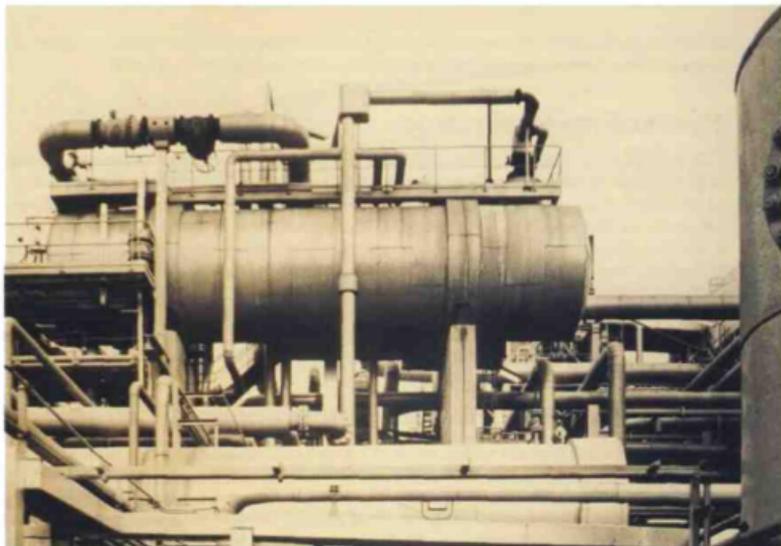
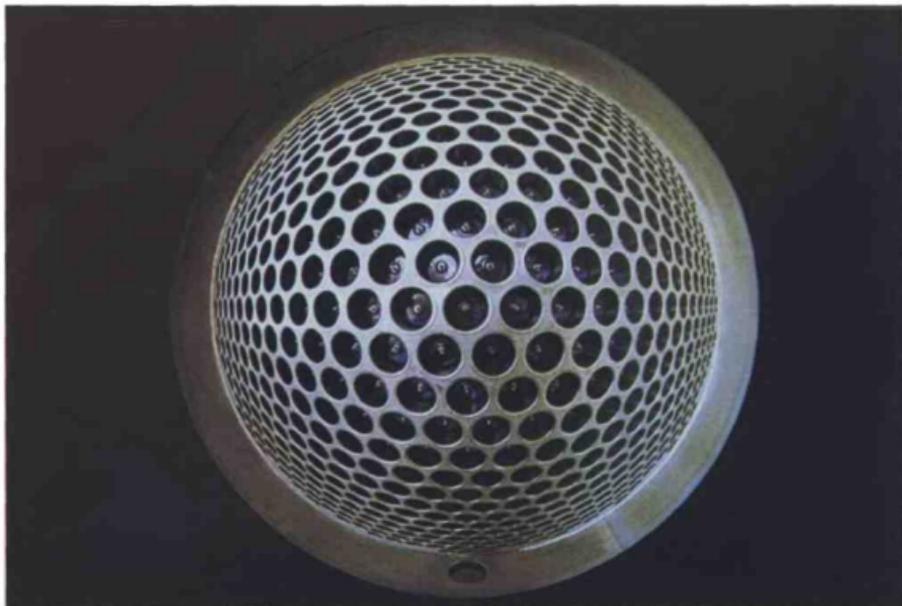


Фото 6. Установка для выпаривания и кристаллизации. Производительность 23 м³/ч (фото компании «Agrochem»)

лизации и позволяющей максимально снизить растворимость калия в барде. Калий выделяется в виде кристаллов, которые поступают в продажу в качестве удобрения. Остаточное содержание калия в полученной таким образом концентрированной барде очень низкое, что дает возможность реализовывать ее на рынке как пищевую добавку для скота (рис 13 и фото 6)

Следует также отметить, что на **теплоэлектростанциях в США** отходы производства от множества установок максимально концентрируются при помощи охлаждающих колонн, продукт промывки которых и другие концентрированные растворы от осмотических аппаратов подаются на выпариватель-кристаллизатор. При этом конденсаты возвращают в котельную, а кристаллическую соль отправляют в центры захоронения отходов



Глава

17

-
1. ОКИСЛЕНИЕ ВОЗДУХОМ 1103
 2. ОКИСЛЕНИЕ И ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ
ХЛОРОМ 1107
 3. ОКИСЛЕНИЕ И ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ
ДИОКСИДОМ ХЛОРА 1112
 4. ОКИСЛЕНИЕ И ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ
ОЗОНОМ 1114
 5. ДРУГИЕ СПОСОБЫ ОКИСЛЕНИЯ
И ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ 1149
 6. ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ
УЛЬТРАФИОЛЕТОВЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ 1150
 7. КРИТЕРИИ ВЫБОРА ОКИСЛИТЕЛЕЙ
И ОБЕЗЗАРАЖИВАЮЩИХ СРЕДСТВ 1165

Окисление и обеззараживание

В этой главе описываются различные технологии, используемые компанией «Дегремон» для реализации процессов окисления и обеззараживания воды (химическим путем, а также с применением ультрафиолетового излучения) Теоретические основы этих методов были изложены в гл. 3, п. 12

1. Окисление воздухом

Для окисления можно использовать кислород воздуха. При давлении, близком к атмосферному, и обычной температуре процессы с его участием протекают в соответствии с законами газожидкостного обмена (см. гл. 3, п. 14, гл. 16, п. 1). Кроме этого, следует напомнить, что

— молекулярный кислород не является хорошим окислителем (см. гл. 3, п. 12) и, следовательно, может быть применен для окисления только легкоокисляемых соединений, таких как Fe^{2+} , Mn^{2+} , S^2 и др.

— насыщение воды воздухом в целях окисления может привести к существенным и нежелательным изменениям ее кальций-углеродного равновесия, так как отдувка CO_2 придает воде инкрустирующий характер и может приводить к выпадению в осадок карбоната кальция.

— контакт воды и воздуха можно также рассматривать как «промывку» последнего, поэтому воздух должен быть чистым, при необходимости предварительно профильтрованным для отделения от пыли, песка, капель масла и др.

Методы, в которых используется кислород воздуха, можно классифицировать по способу контакта жидкой и газовой фаз

- стекание воды по поверхности,
- разбрызгивание воды в воздухе,
- ввод воздуха в жидкость

Перенос кислорода в воду (предварительный для любого окисления) сопровождается потерей напора, создаваемой системой аэрации. В зависимости от выбранного способа аэрации величина потери напора существенно варьируется от нескольких сантиметров водного столба при барботировании до 1 бар и более при разбрызгивании

1.1. Стекание

Для стекания воды на ее пути через контактную загрузку необходимо обеспечить перепад высот от 1 до 3 м

1.1.1. Каскад водосливов

Каскад водосливов (фото 1) используется, когда есть возможность обеспечить перепад высот 1–2 м и не требуется очень высокая эффективность.

На установке с тремя-четырьмя ступенями обычно достигается предел по удалению CO_2 15 мг/л

1.1.2. Стекание по пластинам

Такие системы аэрации более или менее совершенны, так как в них конструктивно обеспечивается усиленная вентиляция



**Фото 1. Сооружение «Maha Savat-krung Ther» (Таиланд).
Производительность 400 000 м³/сут ; четыре ступени
высотой 50 см каждая**

1.1.3. Стеkanie по контактной массе

Данное решение идентично технологии орошаемых биофильтров (см гл. 4)

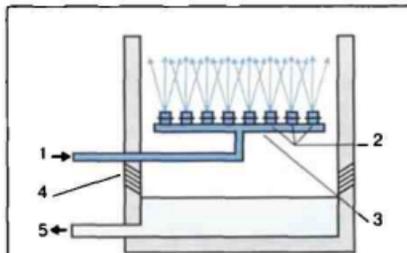
Два последних способа позволяют достичь высокой степени переноса кислорода в жидкую фазу и, соответственно, эффективности окисления

1.2. Разбрызгивание воды в воздухе

Разбрызгивание воды осуществляется с помощью сопел, расположенных на одном или нескольких трубопроводах, разветвленных для увеличения поверхности контакта фаз. Необходимое давление зависит от вида и количества сопел (рис. 1 и фото 2). Подобные аппараты обладают средней эффективностью и используются либо для дегазации (CO_2 , H_2S и т. д.), либо для аэрации воды (удаление железа и марганца). При разбрызгивании воды допускаются лишь незначительные колебания расхода из-за риска снижения эффективности аэрации и окисления.

Не следует применять разбрызгивание для обработки жесткой воды, так как известковые отложения забивают сопла.

При наличии в воде сероводорода необходимо предусмотреть как минимум один коллектор отвода вентиляционных выбросов с последующим их разбавлением или дезодорацией.



- 1 Вода, подлежащая аэрации
- 2 Разбрызгивающие сопла
- 3 Разветвленный коллектор
- 4 Вентиляционные решетки
- 5 Аэрированная вода

Рис. 1. Башня разбрызгивания

1.3. Ввод воздуха в жидкость

1.3.1. Диффузия газа

Данный способ обработки состоит в диспергировании в жидкость газа, подаваемого под давлением. Раньше он ограничивался лишь вводом воздуха при помощи простейшего оборудования (перегородок, диафрагм), сейчас же диффузия становится все более применяемой не только для прямого окисления воздухом, но и для введения CO_2 или озона при обработке питьевой воды.

Подача газа может осуществляться:

- непосредственно в трубопровод под давлением с помощью шайбового смесителя, встраиваемого статического смесителя (фото 3) или устройства, создающего разрежение;



Фото 2. Разбрызгивающие сопла



Фото 3. Встраиваемый статический смеситель

— в контактном сооружении, в этом случае используются системы, аналогичные системам аэрации активного ила (**Oxazur, Vibratr, Dipalr, Flexazur**), а также пористые колпаки и др (см гл 11)

Аэрировать воду можно также с помощью барботирования мощным потоком воздуха при небольшой высоте водного слоя (0,25–0,30 м для питьевой воды), но в этом случае расход воздуха может превышать расход воды в 30–60 раз

1.3.2. Аэраторы с контактной массой (загрузкой)

Контактная масса (загрузка) используется для увеличения поверхности контакта фаз и обеспечения продолжительности контакта благодаря диффузионной системе

1.3.2.1. Аэраторы со свободной поверхностью

Обрабатываемая вода и сжатый воздух подаются параллельными потоками в основание резервуара. Аэрированная вода отбирается на поверхности. Присутствие контактной загрузки улучшает процесс насыщения (рис. 2). Подобный способ аэрации особенно эффективен при обработке воды с высоким содержанием взвешенных частиц

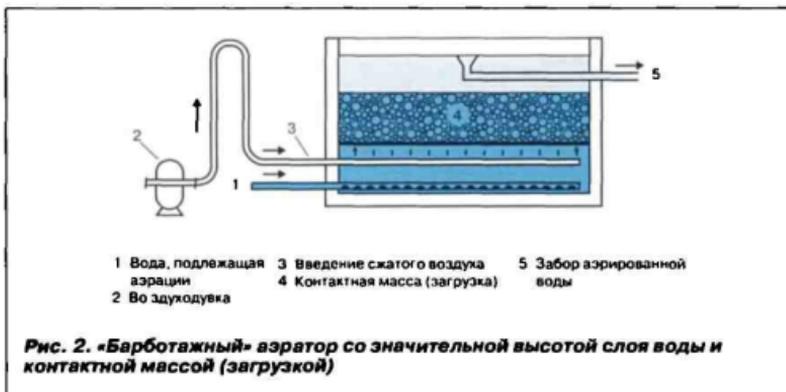


Рис. 2. «Барботажный» аэратор со значительной высотой слоя воды и контактной массой (загрузкой)

В реакторе глубиной 4 м можно достичь степени насыщения 70–80 % при условии расхода воздуха 50–100 м³/ч на 1 м² и воды 10–30 м³/ч на 1 м².

1.3.2.2. Напорные аэраторы

Напорные аэраторы часто используются в технологии деферризации подземных вод. Закрытая окислительная башня содержит слой загрузки — камни вулканической породы на несущем полу (см также гл 22, п 2.1 2). Исходная вода под давле-

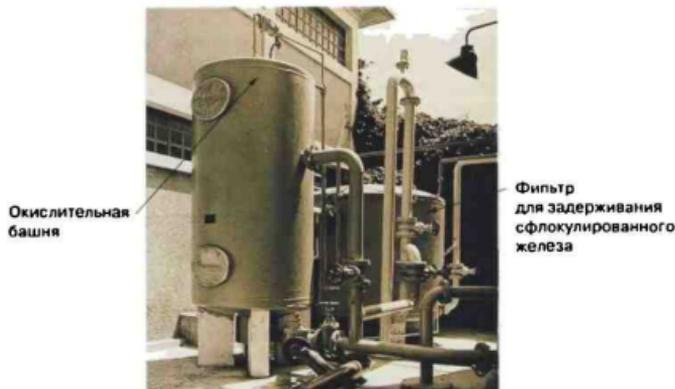


Фото 4. Окислительная башня и фильтр для деферризации питьевой воды. Расход 50 м³/ч (Лангуаран, Жиронда, Франция)

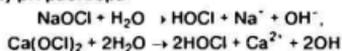
нием подается в смеситель, куда также поступает сильно сжатый воздух. Воздушно-жидкостная смесь вводится в основание слоя загрузки. Возможный избыток воздуха удаляется в атмосферу с помощью специального клапана. Вода собирается в верхней части башни (фото 4)

2. Окисление и обеззараживание хлором

2.1. Источники хлора

Хлорирование вод производится либо газообразным хлором, либо гипохлоритами натрия или кальция (последние более удобны в использовании)

При добавлении гипохлорита, так же как и хлора, в воде образуется хлорноватистая кислота. Однако в реакции с гипохлоритами продуцируются гидроксид-ионы, повышающие величину pH раствора



■ Хлор

На рынке хлор предлагается в жидком виде в баллонах или цистернах по 50 или 1000 кг под давлением 5 бар (см гл. 20, п. 5.1)

■ Гипохлорит натрия

Гипохлорит натрия NaOCl образуется при растворении газообразного хлора в растворе едкого натра при избытке последнего.



Коммерческий водный раствор гипохлорита натрия, известный под названием «железная вода», представляет собой зеленовато-желтую жидкость с величинной pH от 11,5 до 13. Для технических нужд используется раствор с концентрацией

активного хлора 149–159 г/л, что соответствует 47–50' условной хлорометрической шкалы Жавелевая вода для бытового применения имеет концентрацию около 15' (47,5 г/л активного хлора). Раствор гипохлорита натрия относительно неустойчив. Его концентрация может уменьшаться во время хранения в зависимости от температуры, освещения и количества содержащихся примесей. Из-за разложения гипохлорита необходимо постоянно контролировать его концентрацию, чтобы избежать неточностей дозировки и введения побочных продуктов, таких как хлорит- и хлорат-ионы (см. гл. 3, п. 8.2).

Более разбавленные (менее 3') растворы гипохлорита натрия можно получать непосредственно на месте мембранным электролизом из рассола хлорида натрия или морской воды (см. гл. 3, п. 8.2).

■ Гипохлорит кальция

Гипохлорит кальция $\text{Ca}(\text{OCl})_2$ используется в виде таблеток, гранул или порошка. В основном его получают при реакции известкового молока с хлором



Коммерческий продукт содержит 92–94 % по массе гипохлорита кальция, что соответствует 65–70 % активного хлора. Его следует хранить в сухом месте, защищенном от тепла и доступа органических веществ, чтобы предотвратить разложение и нежелательные реакции (иногда бурные). Продукт содержит примеси (хлораты, металлы и др.), и, следовательно, нужно следить, чтобы их концентрация в конечной воде не превышала нормы.

2.2. Области использования

Хлор является токсичным газом. Он в 2,5 раза тяжелее воздуха и в случае утечки скапливается на полу. Оборудование для хранения жидкого хлора должно отвечать всем предписанным правилам и нормам, должно быть задекларировано и разрешено к использованию. В любом случае необходимо уточнить, требует ли законодательство страны установки детектора возможных утечек и системы нейтрализации (см. гл. 20, п. 5.1).

Гипохлорит натрия (жавелевая вода) используется прежде всего в случаях, когда невозможно применить газообразный хлор из-за высоких требований по безопасности его хранения.

Гипохлорит кальция, как реагент, содержащий большой процент активного хлора, используется, в частности, в странах, которые ввиду транспортных расходов не могут обеспечить себя ни газообразным хлором, ни гипохлоритом натрия.

2.3. Применение

Хлор используется для обеззараживания питьевой воды, воды охлаждающих систем, плавательных бассейнов и для третичной обработки городских сточных вод. В основном его применяют для обеззараживания, а также для сдерживания развития различных организмов (водорослей, мидий, ракушек). Он может окислять железо, марганец и соединения, окрашивающие воду или придающие ей неприятный вкус и запах, а также улучшать коагуляцию. Однако возможность образования вредных побочных веществ зачастую заставляет использовать другие окислители.

Хлор из емкостей хранения поступает в воду через дозирующее устройство — хлоратор (см. гл. 20, п. 5.1). Раствор гипохлорита натрия вводится непосредственно в воду с помощью насоса-дозатора. Гипохлорит кальция подают таким же способом, предварительно растворяя. Разбавление растворов гипохлорита жесткой водой может вызвать накипеобразование.

При любом варианте применения хлора необходимо обеспечить быстрое и тщательное перемешивание обрабатываемой воды с хлорсодержащим раствором. Для этого ввод хлора проводят под напором, с механическим перемешиванием, или в статический смеситель. Если используются контактные бассейны, их следует обустроить таким образом, чтобы весь поток обрабатываемой воды имел хотя бы минимальное (требуемое) время для контакта с реагентом.

Доза вводимого хлора определяется по результатам измерения потребности в нем конкретной воды и с учетом требований по остаточной концентрации свободного хлора.

Время необходимого контакта зависит главным образом от цели обработки, наличия примесей (взвешенных частиц, окисляющихся соединений) и условий применения: концентрация свободного хлора, значение pH и температура воды, качество контакта с водой (перемешивание, гидравлика реактора)

2.3.1. Применение для обеззараживания питьевой воды

Среди факторов, от которых зависит эффективность воздействия хлора, решающее значение имеют величина pH и температура воды (рис. 3).

— величина pH влияет на образование хлорноватистой кислоты и ее аниона (эта кислота, считающаяся самым сильным бактерицидным агентом, преобладает в кислой среде); именно это является обоснованием для корректировки величины pH в случае применения гипохлорита.

— с возрастанием температуры увеличивается скорость инактивации микроорганизмов

Расчет реактора для хлорирования воды осуществляется на основе параметра СТ — остаточной концентрации обеззараживающего средства С (мг/л), умноженной на время контакта Т (мин). Этот параметр устанавливается для каждого патогенного микроорганизма в зависимости от температуры и величины pH (табл. 1).

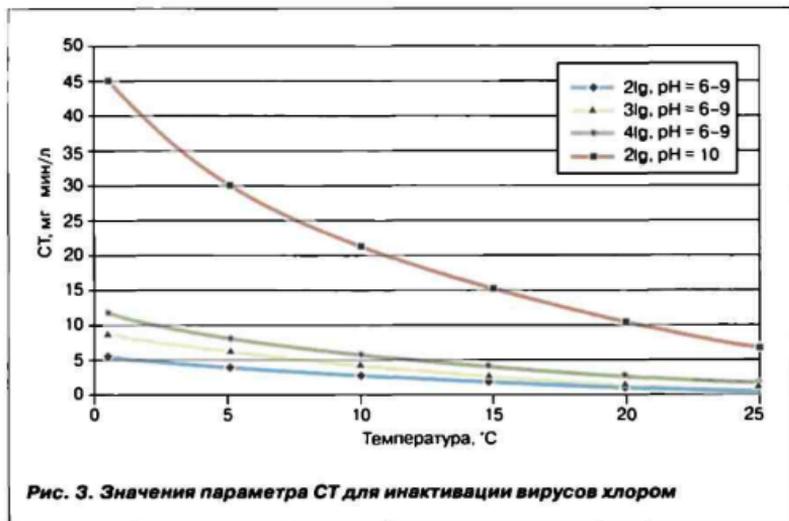


Рис. 3. Значения параметра СТ для инактивации вирусов хлором

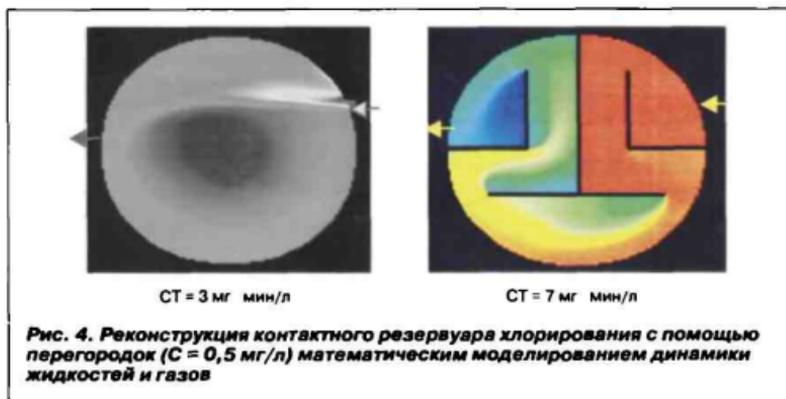
Таблица 1

Значения параметра СТ для инактивации 2lg (99 %) основных микроорганизмов хлором при величине рН = 6–7 и температуре 5–25 °С

Вид	<i>E Coli</i>	<i>Poliovirus 1</i>	<i>Rotavirus</i>	<i>Giardia lamblia</i> (циста)	<i>Giardia muris</i> (циста)	<i>Cryptosporidium</i> (циста)
СТ, мг · мин/л	0,03–0,05	1,1–2,5	0,01–0,05	15–150	30–630	7200

Поддержание концентрации свободного хлора на уровне 0,5 мг/л в течение 30 мин при значении рН ниже 8 позволяет уничтожить одновременно и патогенные бактерии, и вирусы полиомиелита. При инактивации цист простейших, напротив, необходимы высокие значения параметра СТ, исключающие использование хлора из-за необходимости увеличения размеров сооружения и опасности образования побочных продуктов, таких как тригалогенметаны и галогенуксусная кислота, в результате конкурирующей реакции с органическими веществами.

Контактные резервуары сконструированы таким образом, что они по своим характеристикам приближаются к идеальному реактору, в котором обеспечивается строгое равенство продолжительности пребывания воды и времени гидравлического контакта. Форма реактора должна обеспечить течение поршневого характера (режим вытеснения). На практике реальное время контакта берется равным T_{10} — времени прохождения, измеряемому по выходу 10 % потока вещества-метки. Соотношение T_{10} / время гидравлического пребывания позволяет оценить отклонение в распределении пребывания по сравнению с идеальным реактором вытеснения. Оно варьируется от 0,1 до 0,7 в зависимости от формы резервуаров. Его можно увеличить с помощью перегородок, образующих каналы, длина которых может в 50 раз превышать ширину (рис. 4).



Содержание свободного хлора в распределительной сети должно быть достаточным для того, чтобы помешать оживлению бактерий и развитию мельчайших беспозвоночных. Концентрация свободного хлора должна составлять не менее

0,1 мг/л. Она устанавливается на входе в сеть в зависимости от конфигурации последней, а также уровня ее обслуживания и качества воды. Если сеть очень протяженна, может потребоваться дополнительный ввод хлора в различных точках, например в промежуточных резервуарах

2.3.2. Другое применение

Помимо обеззараживания питьевой воды хлор используют и в других случаях обработки вод, общие условия которых приведены в табл. 2

Тип воды	Применение	Условия
Городские сточные воды	Обеззараживание для повторного использования Десульфурация	Хлорирование вторичного потока — частичная (10–15 мг/л свободного хлора), — в точке перегиба (100–150 мг/л свободного хлора)
Промышленные сточные воды	Очистка от цианидов	Добавление щелочного раствора (pH = 11) активного хлора Регулирование дозы на основе анализа остаточного хлора (регулирование величины rH) Время контакта — порядка несколько минут
Охлаждающие воды	Обеззараживание	Постоянное введение гипохлорита натрия вместе с биоцидами (1 мг/л свободного хлора), или периодическое введение (10 мг/л свободного хлора в течение нескольких часов), или шоковое хлорирование (доза хлора выбирается по допустимой для сброса концентрации)
Вода плавательных бассейнов	Обеззараживание	Добавление гипохлорита и кислоты (серной или соляной) для доведения уровня pH примерно до 7 Концентрация свободного хлора 0,3–0,5 мг/л

2.4. Хлорамины

Хлорамины используются только при обеззараживании воды (см. гл. 3, п. 12.4 1). Они производятся на месте в результате реакции хлора с аммиаком или аммиачными солями

По сравнению с монохлорамином хлор при величине pH ≤ 7 соответственно в 200, 20, 50 и 2,5 раза более активен в инактивации бактерий, вирусов, спор и цист (табл. 3). Именно поэтому хлорамины не применяются в первичном обеззараживании. Но благодаря длительности их действия они применяются для вторичного обеззараживания в следующих случаях:

Таблица 3

Значения параметра СТ для инактивации 2lg (99 %) основных микроорганизмов хлораминами при значении рН = 8–9 и температуре 5–25 °С

Вид	<i>E. Coli</i>	<i>Poliovirus 1</i>	<i>Rotavirus</i>	<i>Giardia lamblia</i> (циста)	<i>Giardia muris</i> (циста)	<i>Cryptosporidium</i> (циста)
СТ, мг мин/л	95–180	770–3500	3810–6480	2200	1400	7200 ¹

¹ Для инактивации 1lg (90 %)

- при повышенной концентрации предшественников образования тригалогенметанов в обрабатываемой воде, когда использование хлора запрещено,
 - для протяженной распределительной сети (продолжительное время пребывания и высокие температуры),
 - в трубопроводах с покрытием из материалов, взаимодействующих с хлором, в результате чего ухудшается вкус воды
- Применение хлораминов все больше распространяется в США (где общество привыкло к привкусу хлора в питьевой воде)

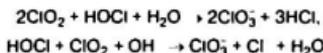
3. Окисление и обеззараживание диоксидом хлора

Диоксид хлора представляет собой нестабильный желтый газ с резким запахом. Чистый диоксид хлора при нагревании, освещении или контакте с органическими веществами бурно разлагается, выделяя хлор. Смесь с воздухом становится взрывоопасной при объемной концентрации диоксида более 10 %.

3.1. Получение

Раствор диоксида хлора всегда производят непосредственно на месте применения окислением хлорита натрия хлором или соляной кислотой (см. гл. 20, п. 6.2).

В обоих случаях значение рН смеси реактивов должно быть очень кислым, чтобы избежать побочных реакций, которые в нейтральной среде приводят к образованию хлорат-иона:



Побочное образование хлората зависит также от концентрации хлорита натрия в реакционной среде. Другим параметром, определяющим ход процесса, является отношение концентраций хлора и хлорита.

При использовании соляной кислоты расходуется в 1,25 раза больше хлорита натрия, следовательно, этот способ более дорогой. Выбор между этими двумя вариантами обусловлен возможностью хранения хлора, т. е. требуется специальная подготовка и оборудование для обеспечения безопасности их применения (см. гл. 20, п. 6.2).

3.2. Области использования

Диоксид хлора — очень сильный окисляющий реагент, он обладает высокой обеззараживающей силой и способностью удалять цветность и запах. Его действие на микроорганизмы, в частности на простейших, значительно быстрее по сравнению с действием хлора (табл. 4). Более выражен также и остаточный дезинфицирующий эффект.

Таблица 4

Значения параметра СТ при инаktivации 2lg (99 %) основных микроорганизмов диоксидом хлора при величине pH = 6–7 и температуре 5–25 °C

Вид	<i>E. Coli</i>	<i>Poliovirus 1</i>	<i>Rotavirus</i>	<i>Giardia lamblia</i> (циста)	<i>Giardia muris</i> (циста)	<i>Cryptosporidium</i> (циста)
СТ, мг мин/л	0,4–0,75	0,2–6,7	0,2–2,1	26	7,2–18,5	78 ¹

¹ При инаktivации 1lg (90 %)

Как и для хлора, эффективность диоксида хлора при обеззараживании воды зависит от температуры. Это можно проследить по величинам параметра СТ для инаktivации цист *Giardia lamblia* и вирусов (рис. 5).

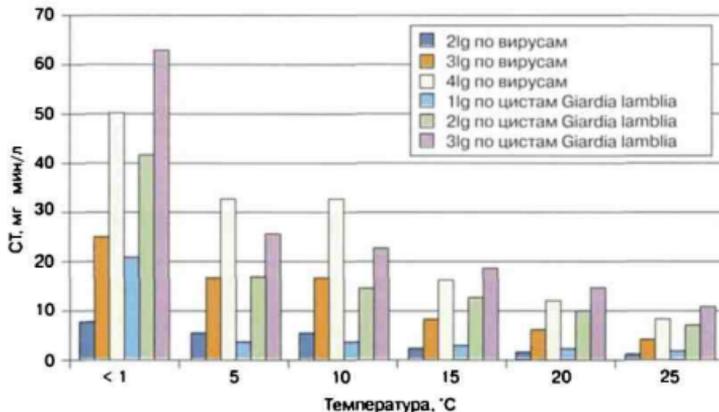


Рис. 5. Значения параметра СТ для инаktivации вирусов и цист *Giardia lamblia* диоксидом хлора

Диоксид хлора не образует галоформы и вещества, обладающие вкусовыми качествами. Поэтому его использование предпочтительнее, чем хлора, если обрабатываемая вода содержит следы фенола, который может реагировать с хлором с образованием хлорфенолов, придающих воде неприятный привкус. Однако нужно учитывать, что диоксид хлора содержит хлораты и их восстановление до хлоритов придает воде неприятный металлический привкус.

Диоксид хлора быстро окисляет соли железа, которые потом могут осаждаться в форме нерастворимого гидроксида железа. Введенный в избытке (в разных дозах в зависимости от величины pH воды), он также окисляет соли марганца до диоксида марганца.

В обработке питьевой воды диоксид хлора используется в ограниченном числе случаев:

- иногда для предварительного окисления, если вода содержит мало органических примесей, поскольку в противном случае окисление органических веществ диоксидом хлора сопровождается образованием токсичных хлорит-ионов,
- для обеззараживания воды. Обычно для обеспечения микробиологического качества воды в водопроводной сети нормой считается остаточная концентрация хлора 0,2 мг/л при условии отсутствия органических примесей. При несоблюдении этого условия использование данного реагента может быть запрещено законодательно из-за образования хлорит-ионов. Большое число стран ограничило используемые для обеззараживания дозы диоксида хлора либо непосредственно — определением максимальной дозы (например, 0,8 мг/л в США), либо косвенно — определением максимального содержания хлоритов и хлоратов в обработанной воде (например, в Европе это является эквивалентом введения 0,4 мг/л диоксида хлора)

3.3. Реализация

Раствор диоксида хлора следует вводить в обрабатываемую воду сразу после приготовления для того, чтобы избежать выделения газообразного диоксида и его разложения в воде на хлорит и хлорат. Диоксид хлора вводится в воду так же, как и другие хлорирующие растворы. Для получения хорошей смеси и предотвращения вышеупомянутых процессов следует предпринять такие же меры предосторожности, как и в случае с хлором. Расчет контактных реакторов осуществляется аналогично.

4. Окисление и обеззараживание озоном

В гл. 3, п. 12, рассматриваются основные свойства озона и важнейшие реакции, делающие его одним из самых эффективных окислителей.

- при обеззараживании;
- для окисления многочисленных органических и минеральных соединений,
- для отбеливания бумажной массы без образования токсичных отходов (см гл. 2, п. 5.6) и т.д.

Данный раздел в основном посвящен описанию:

- оборудования, необходимого для генерации озона и его использования, и происходящих при этом процессов,
- основных областей применения озона, многочисленные примеры будут приведены при описании систем обработки в гл. 22–25

4.1. Генерация озона

4.1.1. Принцип генерации

Озон — нестабильный газ, поэтому его производят непосредственно на месте использования.

Общая реакция получения озона является эндотермической



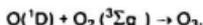
$$\Delta H' \text{ (энтальпия)} = +142,2 \text{ кДж/моль (при давлении } 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па),}$$

$$\Delta S' \text{ (энтропия)} = -69,9 \text{ кДж/(моль } \text{K)}$$

При стандартной реакции величина свободной энергии равна +161,3 кДж/моль и генерация озона путем термической активации невозможна. Синтез озона предполагает распад молекулярного кислорода O_2 на одноатомные радикалы O^{\cdot} в основном состоянии (электронная конфигурация $^3\Sigma_g^-$ или триплет 3P) или в возбужденном состоянии (электронная конфигурация синглет 1D), которые способны вступать в реакцию с кислородом



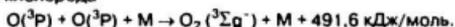
где M — третье вещество,



Энергия, необходимая для получения радикалов $\text{O}(^3P)$ и $\text{O}(^1D)$ из кислорода, возрастает соответственно до 493,3 и 682,8 кДж/моль. Эту энергию могут обеспечить

- высоковольтный электрический разряд в потоке кислорода;
- электролиз воды,
- фотолит кислорода ультрафиолетовым излучением с длиной волны менее 220 нм;
- радиолит кислорода ионизирующим излучением.

Какой бы процесс ни использовался, эффективность производства ограничена вследствие рекомбинации переходных радикалов и распада полученного озона с образованием кислорода:



Единственная технология, позволяющая производить озон в промышленных количествах (>2 кг/ч), — это электрический разряд типа **коронного разряда** в сухом газе, содержащем кислород. Данная технология основана на принципе наложения разности потенциалов, от 3 до 20 кВ, на электроды, между которыми циркулирует газ (рис. 6).

После подачи напряжения электроны, испускаемые катодом, вызывают ионизацию и возбуждение частиц в газе. Электрический ток повышается за счет комбинированного действия серии последовательных ионизаций и вторичных разрядов, вызванных фотонами, испускаемыми частицами в метастабильном или возбужденном состоянии. Возникающая в результате лавина отрицательного электрического заряда очень быстро распространяется в направлении анода. В образовавшейся среде кроме электронов содержатся нейтральные и ионизированные частицы в возбужденном состоянии. Эту среду называют **холодной плазмой** из-за концентрации электронов, температура которых гораздо ниже температуры молекул. Энергии, полученной электронами на этой стадии разряда, будет достаточно для диссоциации кислорода на радикалы и для получения озона путем рекомбинации с молекулами кислорода. Поэтому на данном этапе следует ограничить максимальное напряжение и чередовать полярность подаваемого напряжения в соответствии с достаточно большой частотой (обычно от 600 до 1200 Гц, так называемая средняя частота), чтобы избежать ускорения сопутствующего потока положительного заряженных частиц к катоду и таким образом поддерживать режим коронного разряда

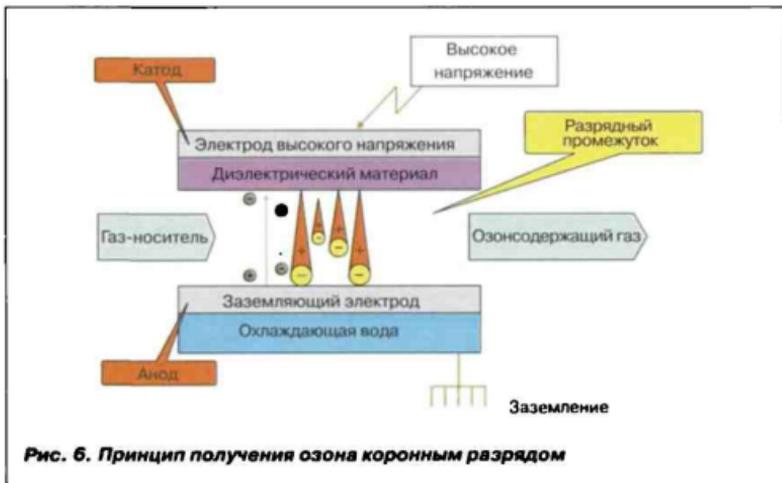


Рис. 6. Принцип получения озона коронным разрядом

Во избежание возникновения дугового режима высоковольтный металлический электрод покрывается диэлектрическим материалом с повышенными диэлектрическими свойствами (стекло, керамика).

Материалом для заземляющего электрода служит нержавеющая сталь. Система может быть трубчатой или пластинчатой. Промышленный генератор состоит из множества единичных систем, соединенных вертикально или горизонтально в корпусе из нержавеющей стали, и блока электропитания.

Большая часть выделяемой энергии рассеивается в виде тепла, которое способно разложить производимый озон. Таким образом, контроль над температурой плазмы имеет первостепенное значение для эффективной работы озонаторов. Для этой цели существует два технических решения:

- **размещение диэлектрика** на одном из электродов, который позволяет распределить мощность разряда по всей поверхности электродов, заставляя поток энергии разряда разряжаться путем распада на множество микроразрядов холодной плазмы (при температуре на 30–50 °C выше средней температуры газа). Напряжение «пробоя» диэлектрического материала должно быть выше, чем точка максимального подаваемого напряжения;
- **охлаждение системы** в целях отвода излишней выделяемой энергии (около 90–95 % выделяемой энергии), осуществляемое посредством циркуляции холодной воды контролируемого качества, обычно только со стороны заземляющего электрода.

Генератор озона питается **воздухом или кислородом**, но все частицы подвергаются электронной активации. Как следствие этого, одновременно с образованием озона происходят несколько вторичных реакций. Основными среди них являются:

- образование оксидов азота, главным образом N_2O_5 и N_2O , в результате конверсии небольшой части азота (до 500 мг/л);
 - углеводороды HC_x , в частности метан CH_4 и этан C_2H_6 , содержащиеся в загрязненном воздухе, полностью окисляются с образованием H_2O и CO_2 .
- Очень важно, чтобы газ-носитель был чистым и сухим, поскольку

- наличие водяного пара непосредственно влияет на эффективность производства озона и приводит к образованию азотной кислоты из азота, содержащегося в воздухе. Азотная кислота и вода оседают на поверхности диэлектрика и делают ее электропроводящей. Рекомендуется использовать газ с точкой росы ниже -65°C и давлением ниже 1 бар абсолютного давления, т. е. содержание водяного пара в воздухе должно быть ниже 5 мг/л. Влажность воздуха уменьшается либо сжатием и охлаждением, либо осушением с использованием адсорбента,
- органические соединения, такие как углеводороды, также оказывают негативное действие. Происходит линейное снижение производительности вплоть до нуля, когда объемная концентрация углеводородов доходит до 1 %. Суммарная концентрация углеводородов из ряда C_nH_m не должна превышать 20 мг/л. Этот по-

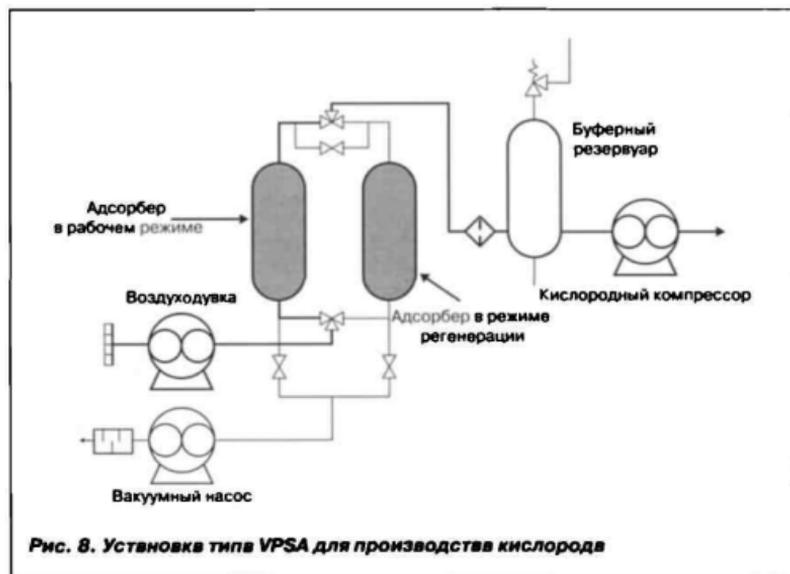
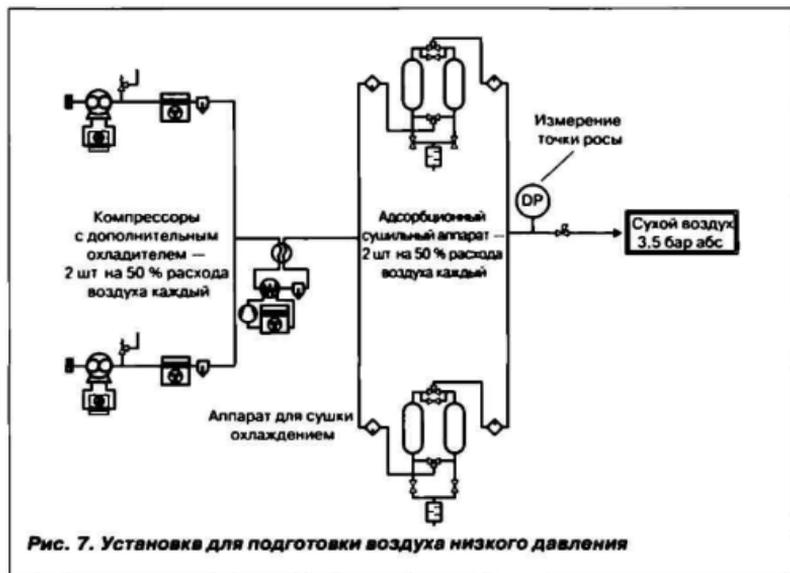
Таблица 5
Промышленные системы питания озонаторов

Способ производства газа-носителя	Производство озона, кг/ч
<ul style="list-style-type: none"> • Воздух низкого давления (< 3 бар) • Воздух среднего давления (5–8 бар) Фильтрация → сжатие (компрессор без смазки) → охлаждение (точка росы от 5 до 10°C , с обменником воздух/вода) → фильтрация → осушение (адсорбцией с использованием активированной окиси алюминия и молекулярного сита) → фильтрация (для отделения частиц размером до 0,1 мкм и через активированный уголь) → снижение давления	> 20–30 < 40
<ul style="list-style-type: none"> • Жидкий кислород Содержание углеводородов из ряда метана в жидком кислороде не должно превышать 20 мг/л. Хранение (15 бар) → испарение (атмосферный или обогреваемый нагреватель) → фильтрация → снижение давления	> 15–20
<ul style="list-style-type: none"> • Кислород, получаемый на месте из воздуха путем адсорбции на молекулярном сите под давлением (PSA — от англ. <i>Pressure Swing Adsorption</i>¹) или при разрежении (VSA и VPSA — от англ. <i>Vacuum Pressure Swing Adsorption</i>²) Компрессия (6 бар с винтовым компрессором для PSA, 1,4 бар с воздуходувкой для VSA и VPSA) → хранение (PSA) > адсорбция ³ → хранение → компрессия (VSA и VPSA) → фильтрация → снижение давления	> 15–20
<ul style="list-style-type: none"> • Кислород, получаемый на месте из воздуха путем создания низких температур Компрессия → осушение → охлаждение → ректификация → компрессия → снижение давления	> 100

¹ Метод получения кислорода из воздуха на молекулярном сите под давлением

² Метод получения кислорода из воздуха на молекулярном сито под вакуумом

³ Регенерация вне цикла производства путем снижения давления до 4 бар (PSA), до 0,6 бар (с насосом с жидким кольцом для PSA, VPSA)



казатель достигается путем фильтрации газа через гранулированный активированный уголь (ГАУ);

— наличие пыли также снижает производительность генератора. Частицы, размер которых превышает 1 мкм, на 99,9 % должны удаляться посредством фильтрации.

Если же в качестве газа-носителя используется очень чистый кислород, полезно ввести в него немного азота (несколько процентов), чтобы повысить эффективность генерации озона иницированием вторичных лавин, особенно если необходимо получить озон высокой концентрации (6 % по массе и более)

Таким образом, производство озона зависит:

- от состава используемого газа (концентрация кислорода, загрязненность);
- от характеристики разряда (напряжение, частота тока и электрическая мощность в целом);
- от температуры и давления газа;
- от геометрии и типа системы (межэлектродное пространство, обычно от 1 до 3 мм, длина и поверхность электродов, радиус труб, диэлектрическая постоянная).

Система подачи газа выбирается в зависимости от необходимого объема производства озона, возможностей повторного использования непрореобразованного кислорода и расходов, связанных с различными технологиями производства газа-носителя (табл. 5).

На рис. 7 и 8 показаны схемы установки для подготовки воздуха низкого давления и производства озона, возможностей повторного использования непрореобразованного кислорода — адсорбция на молекулярном сите под вакуумом).

Выход озона на любом озонаторе может быть отрегулирован изменением напряжения и частоты электропитания в пределах, установленных в зависимости от свойств газа-носителя и диэлектрического материала. В обработке воды используются главным образом два типа озонаторов:

- низкочастотные (от 50 до 60 Гц) воздушные озонаторы;
- среднечастотные (от 60 до 1000 Гц) воздушные или кислородные озонаторы.

Подаваемое напряжение уменьшается с повышением частоты и изменяется в зависимости от конструкции (производителя).

Табл. 6 позволяет сравнить рабочие характеристики озонаторов в зависимости от качества газа-носителя.

Полученный озон необходимо ввести в обрабатываемую воду, обеспечив наилучшую его диффузию.

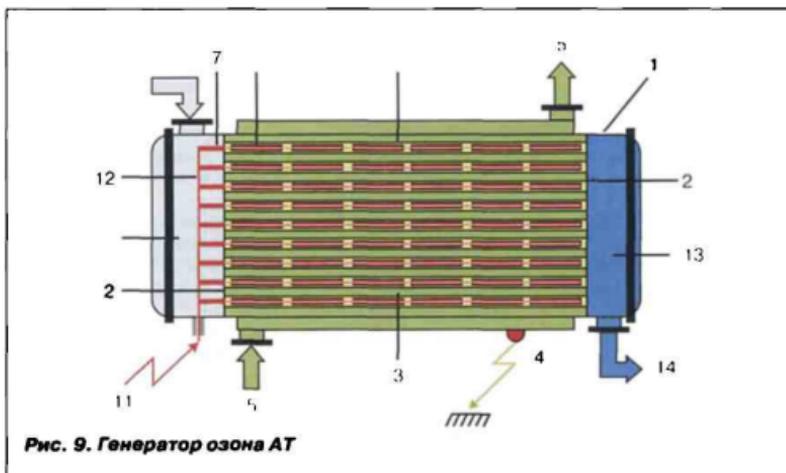
Таблица 6
Рабочие характеристики промышленных озонаторов

Газ питания	Воздух	Кислород
Максимальная часовая производительность озонатора, кг/ч	75	200
Обычная концентрация озона в газе-носителе при нормальных условиях, г/м ³	20–40	70–180
Удельная мощность для получения 1 кг озона, кВт ч/кг	13–20	7–13

В технологическую линию производства озона входят установка для подготовки и подачи газа-носителя, озонатор, реактор и система уничтожения остаточного озон-содержащего газа

4.1.2. Озонаторы компании «Озония»

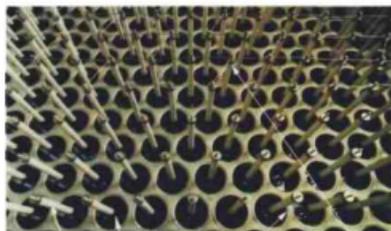
Озонатор состоит из следующих основных элементов (рис 9)



- основной цилиндрический корпус (1) с двумя трубными решетками (2), несущими металлические трубки (3) из нержавеющей стали,
- трубки (3) служат вземляющим электродом [заземление (4)] Охлаждающая вода (5) циркулирует вокруг металлических труб, распределяется и равно-



Фото 5. Сегмент AT



Предохранитель
ЯН
Сегмент
AT
Стержень
AT
ВН-соединение

Фото 6. Лицевая сторона озонатора компании «Озония»: расположение и соединение сегментов AT

мерно отводится с помощью двух распределительных устройств, расположенных сверху и внизу вдоль корпуса.

— **диэлектрики** (6), называемые **сегментами АТ** (от англ. *advanced technology* — передовая технология), представляют собой **трубки из нержавеющей стали**, которые служат **электродами высокого напряжения**. На трубку тонким слоем (толщина которого тщательно выверяется) нанесен специальный **диэлектрический материал**, подобный керамике (фото 5). Каждый сегмент АТ тестируется на заводе под напряжением, которое примерно в 1,5 раза превышает точку максимального напряжения, подаваемого на систему. Напряжение пробоя у сегмента АТ превышает 30 кВ. Сегменты АТ самостоятельно центрируются в металлических трубках. В одной металлической трубке находится до шести сегментов АТ, и она представляет собой **ячейку генерации озона**. Каждая ячейка закреплена на **металлическом стержне**, обеспечивающем непрерывный электрический ток между сегментами, и защищена отдельным **предохранителем высокого напряжения (ВН)** (7) (более подробно см фото 6) Поступающий

Таблица 7

Основные технические характеристики озонаторов компании «Озония»

<i>Характеристика</i>	<i>ZFR -AT-</i>
Производительность по озону Газ-носитель — воздух Газ-носитель — кислород	От 5 до 50 кг O ₃ /ч (массовая концентрация от 2 до 6 %) От 10 до 200 кг O ₃ /ч (массовая концентрация от 6 до 16 %)
Давление на входе Газ-носитель — воздух Газ-носитель — кислород	От 3 до 3,5 бар абс. От 2 до 2,5 бар абс.
Температура охлаждающей воды на входе на выходе Расход охлаждающей воды Газ-носитель — воздух Газ-носитель — кислород	От 5 до 32 °C От 10 до 36 °C От 2 до 2,5 м ³ /кг O ₃ От 1 до 1,5 м ³ /кг O ₃
Электропитание Максимальное напряжение Частота Активная мощность	От 3 до 5 кВ (зависит от газа-носителя и требуемой концентрации озона) От 800 до 1 100 Гц (номинальное значение зависит от максимально допустимого высокого напряжения и плотности рабочей мощности, выбранной для генератора) От 75 до 1800 кВт
Контроль производства озона	Посредством изменения тока



газ-носитель (8) циркулирует в узком кольцевом пространстве (9) между сегментами АТ и металлической трубкой, где и происходят микроразряды;

— камера впуска (10) газа-носителя, в которой находится ВН-клемма (11) подачи электроэнергии и ВН-соединение (12) между ячейками генерации озона (см. фото 6);

— камера отвода (13) озонированного газа в коллектор (14).

В табл. 7 приведены основные технические характеристики озонаторов компании «Озония» ZFR «АТ».

Типичные значения удельного потребления электроэнергии (в сети) и объема охлаждающей воды с температурой, равной 20 °С:

— газ-носитель — воздух, массовая концентрация озона 3 %:

$$15,4 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг O}_3, 2,3 \text{ м}^3 \text{ воды/кг O}_3;$$

— газ-носитель — кислород, массовая концентрация озона 10 %:

$$8,75 \text{ кВт} \cdot \text{ч/кг O}_3, 1,2 \text{ м}^3 \text{ воды/кг O}_3.$$



Преимущество использования кислорода очевидно, если концентрация озона и расход энергии для его производства признаются важными критериями

На рис. 10 и 11 соответственно показано влияние концентрации озона и температуры охлаждающей воды на потребляемую энергию.

■ Электропитание

Задача блока электропитания заключается в том, чтобы трансформировать энергию, забираемую из трехфазной электрической сети, в однофазное питание средней частоты с надлежащей и контролируемой формами кривой напряжения или тока. Кривая однофазного тока средней частоты должна иметь квадратную форму, вследствие чего кривая однофазного напряжения средней частоты будет иметь почти треугольную форму.

Ниже приведены основные элементы блока электропитания типа «FP» компании «Озония» (рис. 12 и фото 8)

- устройство (1) соединения с сетью с выключателем (1а) и коммутационными катушками индуктивности или трансформатором (1б),
- в секции переменного тока (2) — компенсатор величины реактивной мощности [CFP — (2а)] до стандартного значения 0,92 индуктивности и выключатель (2б),
- в секции постоянного тока (3) — преобразователь тока [CA/CC — (3а)] с контуром регулирования тока [RCC — (3б)] и катушка индуктивности для сглаживания постоянного тока [CC — (3с)],
- в секции переменного тока средней частоты (4) — инвертор [CC/CA средней частоты — (4а)] и трансформатор высокого напряжения (4б);
- автомат контроля и управления [PLC — (5)]



Фото 7. Четыре генератора озона ZFR «AT» производительностью 60 кг O₃/ч с массовой концентрацией 10 % в кислороде

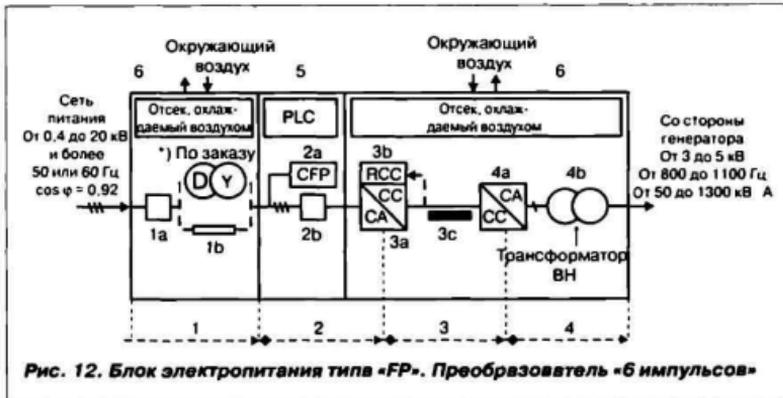




Фото 8. Блок электропитания типа «FP»: преобразователь «6 импульсов», 1,05 МВ · А (трансформатор ВН установлен вне шкафа)

Общий КПД блоков электропитания типа «FP» компании «Озония» составляет 90 %. Их необходимо охлаждать посредством вентиляции (б), а источники питания большой мощности — посредством оборотной системы охлаждения деионизированной водой

4.2. Перенос озона

Образовавшийся озон находится в виде газа, разбавленного в воздухе или кислороде. Используется же он в основном в виде водного раствора (см. реакции, описанные в гл. 3, п. 12 4 4). Очевидно, что реакционная способность раствора зависит от количества озона, перешедшего в жидкую фазу. Сначала озон должен диффундировать из газовой фазы к поверхности раздела газ–жидкость, затем раствориться в жидкости и распространиться вглубь

Скорость переноса зависит.

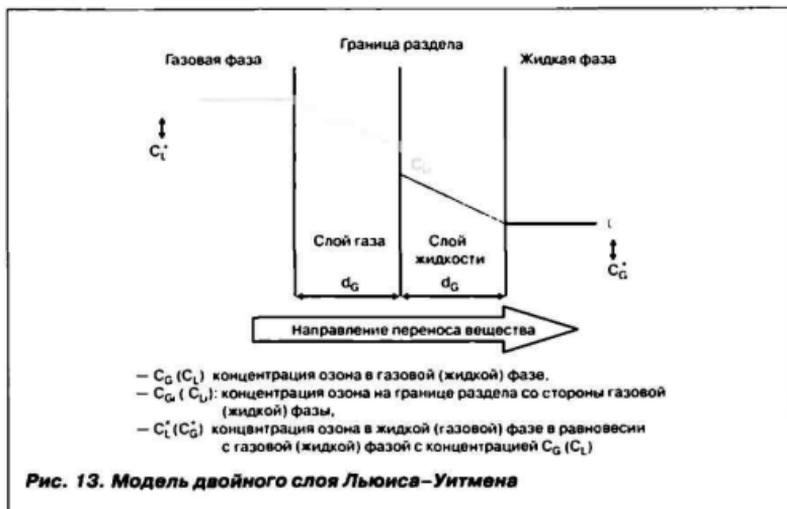
- от физических свойств обеих присутствующих фаз;
- от разницы концентраций по обе стороны от границы раздела, связанной со скоростью химической реакции, с которой потребляется озон;
- от степени турбулентности среды

4.2.1. Моделирование процесса переноса озона

Общее уравнение переноса имеет следующий вид

$$\left[\begin{array}{c} \text{Количество переносимого} \\ \text{озона в единицу времени} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c} \text{Коэффициент} \\ \text{переноса} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \text{Поверхность} \\ \text{обмена} \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \text{Потенциал} \\ \text{обмена} \end{array} \right]$$

Ряд моделей, основанных на различных гипотезах поведения жидкости, позволяют представить перенос озона в жидкую фазу. Среди них различают модель двойного слоя, модели обновляющейся поверхности, модели проникновения, комбинированные модели и т. д. Самой простой и чаще всего используемой является модель двойного слоя Льюиса–Уитмена (Lewis–Whitman) (рис. 13)



Эта модель основывается на следующих предположениях
 — между газовой и жидкой фазами существует не имеющая толщины поверхность раздела;

— по обе стороны от поверхности раздела находятся приповерхностные слои газовой (толщиной δ_G) и жидкости (толщиной δ_L), они сопротивляются переносу озона; каждый из слоев характеризуется собственным коэффициентом передачи,

— на поверхности раздела фазы находятся в равновесии и связаны законом Генри (Henry) $C_G = m \cdot C_L$, где m — коэффициент распределения, связанный с константой Генри,

— вне приповерхностных слоев фазы однородны по концентрации,

— передача вещества через слои происходит постоянно

Количество вещества N , передаваемое через поверхность раздела в единицу времени (помимо химической реакции), описывается уравнением

$$N = k_G \cdot A(C_G - C_G) = k_L \cdot A(C_L - C_L) = K_L \cdot A(C_G^* - C_L), \quad (1)$$

где

k_G и k_L , K_G и K_L — коэффициенты переноса вещества (общие) в каждой фазе;

A — площадь поверхности переноса вещества.

Поскольку озон плохо растворим в воде, сопротивление переносу веществ в основном оказывается в приповерхностном слое жидкости; откуда следует, что $K_L \approx k_L$ и $C_G \approx C_G^*$, откуда $C_L \approx C_L^*$, и, выражая A как функцию a — площади обмена на единицу объема жидкой фазы, из уравнения переноса выводится произведение $k_L \cdot a$, которое носит название **общего параметра переноса вещества**:

$$N = (k_L \cdot a)(C_G^* - C_L)V_L$$

Это уравнение лежит в основе оценки скорости переноса вещества в любом массообменнике (абсорбере или контакторе) Для применения его на практике необходимо знать следующие параметры:

- k_L — коэффициент, который зависит от гидродинамического режима жидкой фазы,
- C_L — концентрация озона, которая зависит от условий перемешивания и скорости химической реакции;
- C_L^* — концентрация озона в жидкой фазе при насыщении, которая зависит от концентрации в газовой фазе, от температуры, от давления и состава жидкой фазы.

4.2.2. Концентрация озона при насыщении

Концентрация озона при насыщении C_L^* представляет собой концентрацию растворенного озона, находящегося в равновесии с концентрацией в газовой фазе, при данных температуре и давлении и в отсутствие реакции. Ее часто называют **растворимостью**, хотя, строго говоря, растворимость газа — это равновесная концентрация растворенного газа при нормальных условиях (температура 0 °С и давление 1 атм). Поскольку озон малорастворим в воде, равновесие подчиняется закону Генри: $x \cdot \text{He} = y \cdot P$, где x/y — молярная доля озона в жидкой/газовой фазе, P — давление газа и He — константа Генри. Считая, что озон — это идеальный газ и он образует разбавленные водные растворы ($x < 0,05$), известный разделительный коэффициент m , который также называется соотношением растворимости и определяется как соотношение концентраций, выраженных в одних и тех же единицах (г/м^3 или моль/м^3): $C_L^* = m \cdot C_G$, можно связать с константой Генри следующим образом

$$m = 461,53 \frac{\rho}{\text{He}} \frac{T}{P}$$

где.

ρ — плотность воды, кг/м^3 ,

T — температура, К ,

He — константа Генри, Па

Давление газа равно 1 атм, или 101,325 кПа.

Оказывается, что He , ρ , а следовательно, и коэффициент m изменяются в зависимости от температуры. Результаты самых недавних исследований правильно выражены в эмпирическом законе:

$$\ln m = -4,55 \cdot 0,1 - (4,8 \cdot 0,01 T),$$

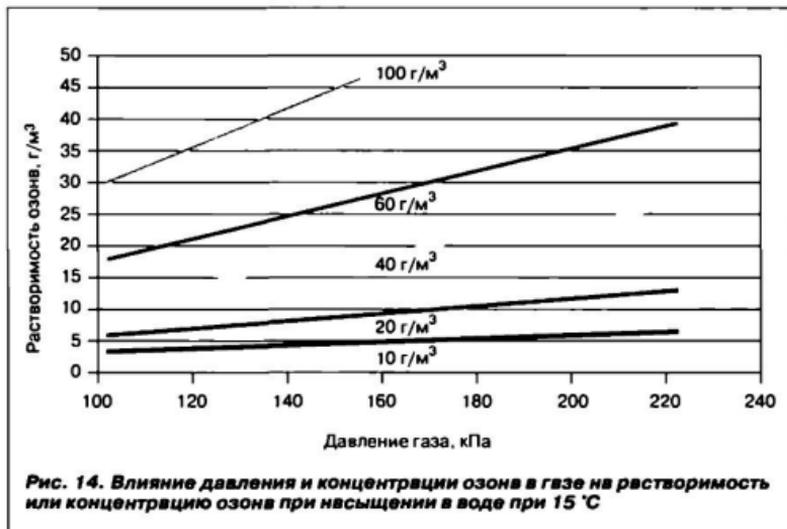
где температура T выражена в °С (при давлении 1 атм).

Различные уравнения показывают, что три физических параметра оказывают важнейшее действие на равновесие концентраций озона в газовой и жидкой фазах:

- увеличение давления газа или концентрации в газовой фазе ведет к линейному росту концентрации озона, растворенного до насыщения, при соответствующей температуре (рис. 14);
- и напротив, концентрация озона, растворенного до насыщения, уменьшается, когда температура растет (гл. 8, п. 3.3.7.1, рис. 36), а другие параметры остаются неизменными.

На практике на равновесие концентрации озона между жидкой и газовой фазами также влияют другие параметры. Самыми важными среди них являются величина рН и ионная сила:

- уровень рН оказывает влияние на скорость распада озона. Оно особенно ощутимо с момента, когда значение рН поднимается до 8 и ведет к снижению равновесной концентрации растворенного озона (см. гл. 8, п. 3.3.7.1, рис. 37). Так, экспериментальные данные приводят к формуле кажущейся константы Генри.



$$Ne_{\text{находящаяся}} = 3,84 \cdot 10^7 [\text{OH}^-]^{0,035} \exp(-2428/T),$$

где $Ne_{\text{находящаяся}}$ выражена в атмосферах, температура T — в кельвинах, а концентрация $[\text{OH}^-]$ — в молях на литр;

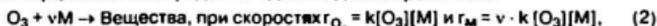
— воздействие ионной силы на равновесную концентрацию озона становится значительным, когда содержание растворенных минеральных солей превышает 1000 мг/л.

4.3. Выбор реакторов озонирования

В гл. 3, п. 12.4.4, было показано, что озон может вступать в молекулярную реакцию (озон — активный окислитель) и/или в реакцию с участием свободных радикалов (активным окислителем является радикал гидроксила, образовавшийся при распаде озона) в зависимости от состава среды, в которую он вносится. Эта реакция может изменить перенос озона.

4.3.1. Кинетический аспект и гидравлика реактора

Выбор наиболее подходящего для озонирования реактора зависит от условий протекания реакции. В целом скорость реакции озона с минеральными, органическими соединениями и микроорганизмами выражена уравнением второго порядка с парциальными порядками 1 для каждого из реагентов:



где:

k — константа скорости реакции;

ν — стехиометрический коэффициент;

$[\text{M}]$, $[\text{O}_3]$ — концентрации соединения M и растворенного озона соответственно;

r_M, r_{O_3} — скорость исчезновения соединения М и растворенного озона соответственно.

Значения констант скорости реакции k меняются в значительных пределах в зависимости от реакционной способности соединений М в отношении озона. Количественные показатели приведены в гл. 3, п. 12 4.4.

При парциальном порядке 1 реактор с жидкой фазой в режиме вытеснения будет всегда более эффективным по сравнению с реактором идеального перемешива-

Таблица 8
Характеристика условий протекания реакции и критериев выбора

Режим протекания реакции	Определяющая характеристика	Тип реактора
Случай 1: $Na < 0,02$ Реакция очень медленная и протекает только в жидкой среде. Перенос через слой осуществляется легко ($E = 1$)	Время пребывания жидкости в реакторе ¹	Барботажная колонна
Случай 2: $0,02 < Na < 0,3$ Реакция медленная и протекает в жидкой среде. Однако скорость реакции может быть достаточно быстрой для того, чтобы концентрация растворенного озона получилась очень слабой. Вместе с тем она слишком медленная, чтобы ускорить перенос озона ($E = 1$)	Время пребывания жидкости в реакторе и площадь переноса в единице объема а	Барботажная колонна или реактор с перемешиванием
Случай 3: $0,3 < Na < 3$ Реакция умеренно быстрая. Реакция осуществляется одновременно в слое жидкости и в жидкой среде ($E \approx \sqrt{1 + Na^2}$)	Время пребывания жидкости в реакторе и площадь переноса в единице объема а	Реактор с перемешиванием
Случай 4: $Na > 3$ Реакция быстрая, полностью осуществляется в слое жидкости. Концентрация растворенного озона в жидкой массе нулевая ($E = Na$)	Площадь переноса в единице объема а	Насадочная колонна
Случай 5: $Na \gg 3$ Реакция мгновенная. Она протекает в слое жидкости ($E = Na$)	Коэффициент переноса k_L (турбулентность в жидкой фазе) и площадь обмена а	Статический смеситель, эжектор
Случай 6: $Na \gg 3$ Реакция мгновенная. Она протекает на поверхности раздела. Сопротивление переносу осуществляется в газовом слое ($E = Na$)	Коэффициент переноса k_G (турбулентность в газовой фазе) и площадь переноса в единице объема а	Колонна с насадкой или с пористыми пластинами, трубка Вентури

¹ Во Франции время пребывания жидкости в реакторе обозначается t_L

ния. Следовательно, реакторы озонирования следует проектировать таким образом, чтобы протекание жидкой фазы было максимально близко к режиму вытеснения.

4.3.2. Критерии выбора реакторов озонирования

Критерий Хатта (Hatta) — безразмерное число (Ha), позволяет охарактеризовать режим протекания реакции окисления и таким образом выбрать реактор для контакта газ-жидкость в соответствии с определяющей характеристикой, как показано в табл. 8. Например

— очень низкое число Хатта означает, что способность переноса жидкого слоя велика и превышает скорость потребления озона. В таком случае речь идет о **химическом** режиме;

— и наоборот, при большом числе Хатта скорость потребления озона может быть значительно выше потока переносимого озона: тогда речь идет о **диффузионном** режиме.

Для необратимой реакции второго порядка этот критерий будет таким:

$$Ha = \frac{D_O \cdot k [M]}{k_L}$$

где

D_O — диффузионная подвижность озона выражена в $\text{м}^2/\text{с}$, k — в $(\text{моль/л})^{-1}/\text{с}$,

$[M]$ — концентрация соединения M , моль/л,

k_L — коэффициент переноса вещества со стороны жидкости, м/с.

Поток озона, переносимого в соответствии с уравнением (1), имеет следующее выражение:

$$N = E (k_L a) (C_L^* - C_L) V_L$$

где E — коэффициент ускорения переноса озона, который зависит от реакции в жидкой фазе и связан с числом Хатта.

На рис. 15 показаны профили концентрации рядом с границей раздела для различных рассмотренных случаев (см. табл. 8) на базе модели с двойным слоем.

4.3.3. Реакторы озонирования

Основные реакторы для контакта озон-вода представлены ниже в соответствии со случаями в табл. 8.

4.3.3.1. Барботажная колонна и камера озонирования, оборудованные пористыми диффузорами

Барботажная колонна является наиболее классическим контактным реактором для озонирования, используемым в обработке воды. Данный тип реактора бывает двух видов: обычная барботажная колонна и камера озонирования с несколькими последовательными отсеками. Оба реактора схематично изображены на рис. 16. Пористые диффузоры, установленные в основании барботажных колонн, формируют пузырьки диаметром около 3 мм, которые равномерно распределяются по всей площади поперечного сечения колонны (фото 9). Газ и жидкость перемещаются в противоположных направлениях, при этом вода вводится в головную часть колонны. Противоток может также создаваться с помощью перегородок в каждом отсеке камеры озонирования. В реакторах этого типа уровень воды над диффузорами — 5–7 м. Число отсеков (обычно 2 или 3) определяется скоростью химической реак-

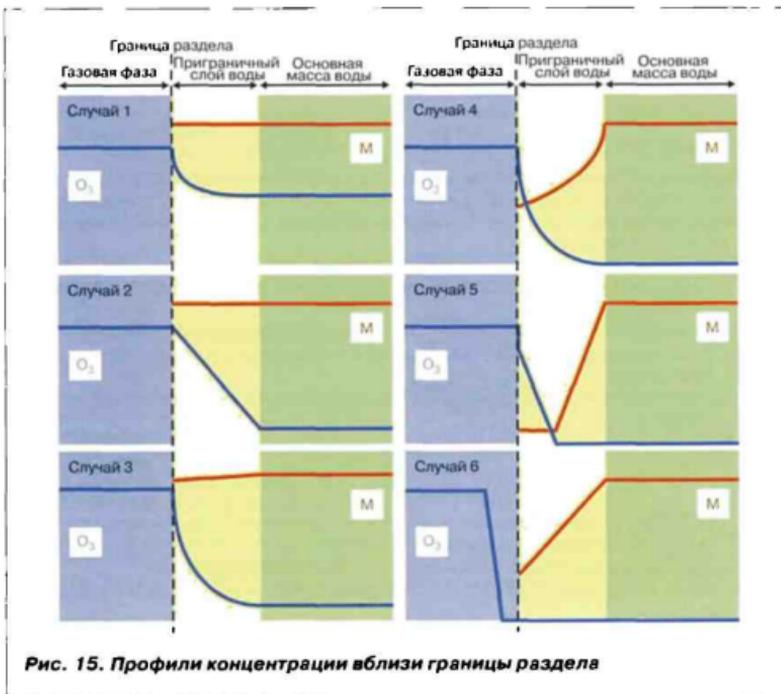


Рис. 15. Профили концентрации вблизи границы раздела

ции и распределением расхода озонсодержащего газа в зависимости от протекания реакции (см также рис 26)

4.3.3.2. Реактор с турбиной или радиальным диффузором

Реактор с перемешиванием турбиной или радиальным диффузором позволяет эффективно смешать воду и озон в зоне контакта и обеспечить дисперсию газа по всей жидкой массе

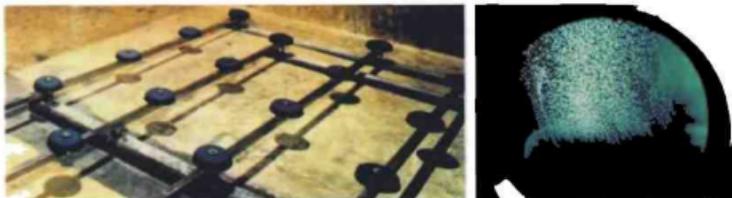


Фото 9. Пористые диффузоры диаметром 180 мм, их расположение в камере озонирования и образование пузырьков

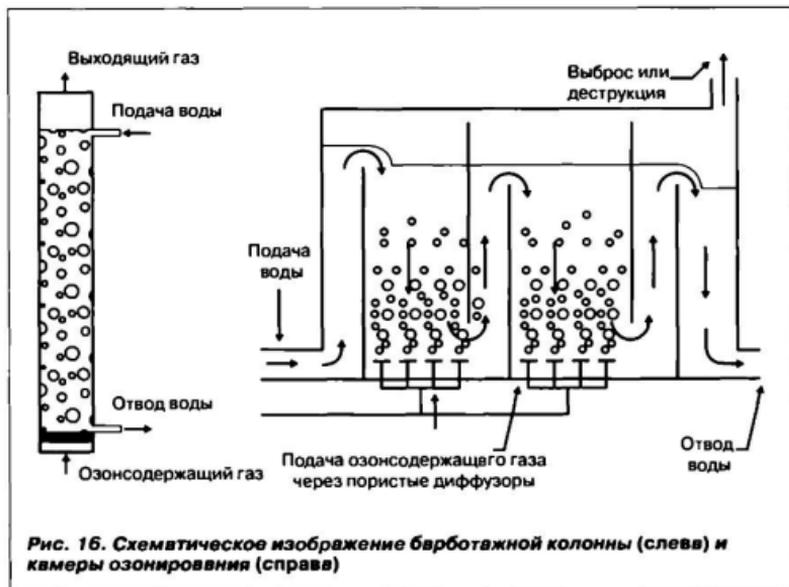


Рис. 16. Схематическое изображение барботажной колонны (слева) и камеры озонирования (справа)

Смешивание может производиться с помощью:

- турбины с радиальными лопастями, которая всасывает обрабатываемую воду и подает ее вблизи потока озонсодержащего газа, прорезая газовые пузырьки (рис. 17),
- радиального диффузора, который выбрасывает создаваемый гидрозжектором турбулентный поток смеси озонсодержащего газа и воды (рис. 18), — газ всасывается гидрозжектором, переносится и распространяется в воде, рециркулируемой с помощью насоса под разрежением, которое возникает при сужении

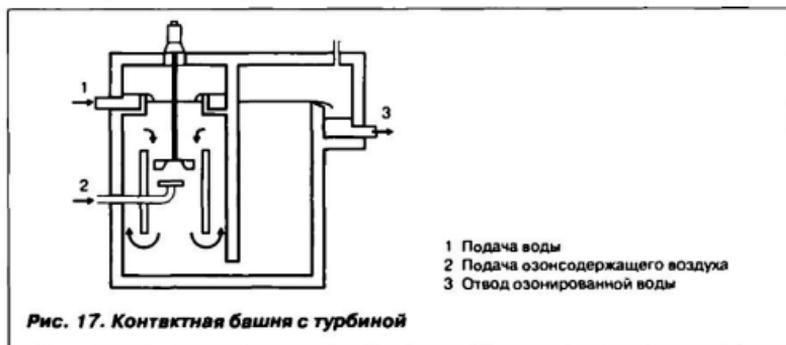


Рис. 17. Контактная башня с турбиной

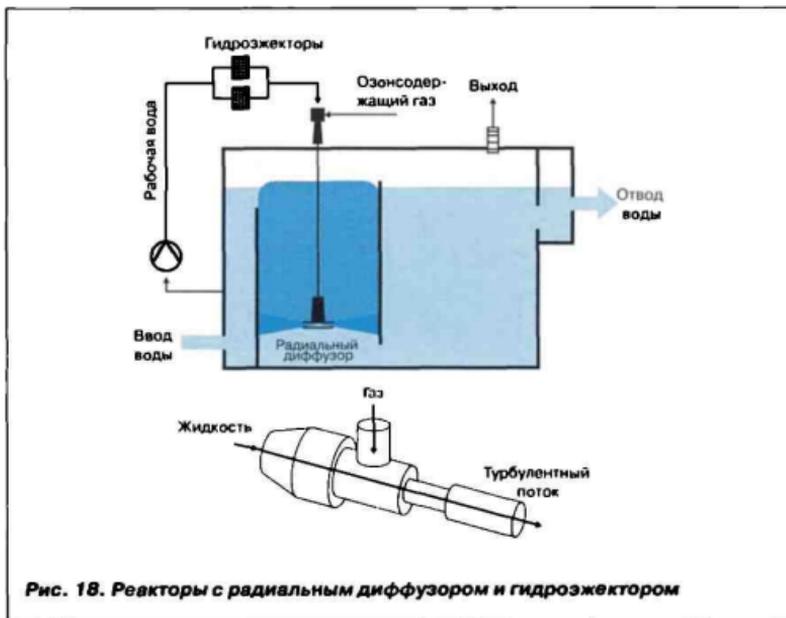


Рис. 18. Реакторы с радиальным диффузором и гидрожектором

потока жидкости. Данный вариант обеспечивает лучший перенос озона: в гидрожекторе одновременно осуществляется дисперсия газа и его смешивание с обрабатываемой водой.

4.3.3.3. U-образный реактор

U-образный реактор представляет собой две вертикальные концентрические трубы, сообщающиеся в нижней части (рис. 19). С помощью высокоскоростного насоса озонсодержащий газ подается со скоростью около 1,7 м/с и распространяется в нисходящем потоке обрабатываемой воды, находящейся в центральной трубе. Максимально допустимое соотношение расхода газа и жидкости составляет 0,17. В центральной трубе под воздействием скорости воды и роста давления образуются пузырьки малого размера. Сформированная эмульсия поступает восходящим потоком в кольцевое пространство реактора. Гидростатическое давление и продолжительность пребывания пузырьков газа в воде оказываются значительными, поскольку высота слоя воды обычно составляет 20 м. В результате облегчается процесс переноса озона в воду

4.3.3.4. Насадочная колонна

В насадочной колонне подлежащая обработке вода подается противотоком газу, насыщенному озоном (рис. 20). Поступая сверху, она течет вниз под действием силы тяжести и распределяется в виде тонкой пленки и капаль по поверхности насадки. Смачивание элементов насадки способствует увеличению поверхности контакта газовой и жидкой фаз.

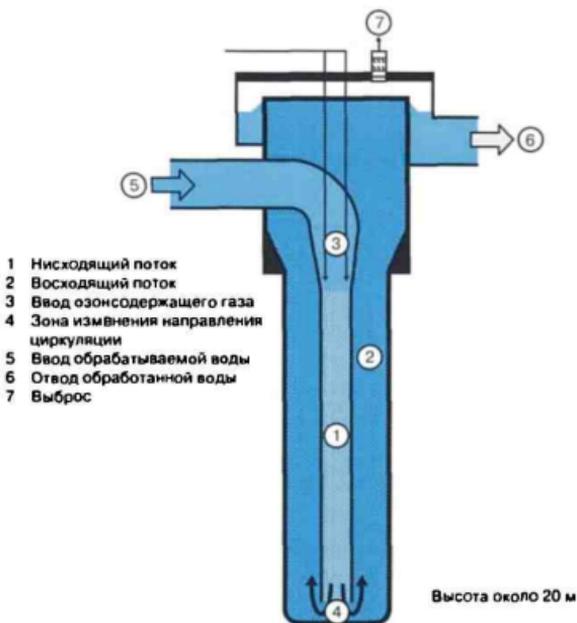
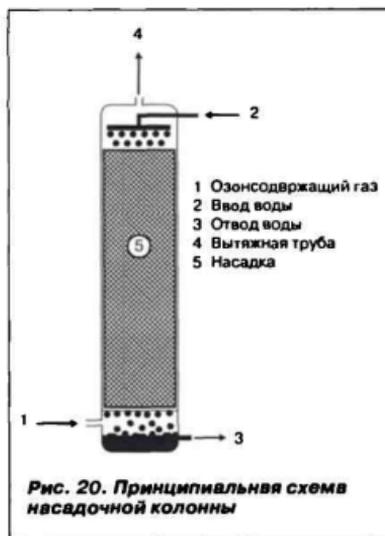


Рис. 19. Диффузия озона в воде — U-образный реактор

Насадка может быть засыпана в колонну произвольно либо уложена в определенном порядке. Она может быть из нержавеющей стали или керамики, должна обладать как можно большей удельной поверхностью и низким гидравлическим сопротивлением.

4.3.3.5. Статический смеситель

Статический смеситель представляет собой трубу, в которой установлены неподвижные элементы, позволяющие смешивать фазы благодаря последовательным разделениям потока. Такой смеситель монтируется в трубопровод, вода в него подается насосом и проходит со скоростью 0,5–1,7 м/с, а озон вводится в воду через специальные сопла, расположенные до зоны смешения. В реакторе образуются пузырьки газа диаметром порядка 1 мм, способствующие формированию значительной поверхности контакта фаз. Важнейшей характеристикой статического реактора является потеря напора, определяющая рассеивание энергии и размер пузырьков. Потеря напора зависит от расходов потоков, типа и количества элементов смесителя. Она может варьироваться в пределах 0,05–0,30 бар на погонный метр статического смесителя. Смеситель данного типа используется для ввода газа в головную часть контактной камеры аналогично гидроэжектору, а также для переноса озона



в жидкую фазу. В классический вариант установки озонирования входит первичный смеситель для диспергирования газа, установленный на параллельной обводной линии, и основной статический смеситель, в котором осуществляется процесс переноса озона (рис. 21). В зависимости от допускаемой потери напора первичный смеситель может быть заменен на гидрожектор. Обычно такая установка озонирования дополняется на выходе дегазационной колонной для разделения фаз.

Характеристики основных описанных выше реакторов озонирования сравниваются в табл. 9.

На выбор реактора в каждом конкретном случае применения влияют следующие определяющие процесс факторы.

- время контакта для медленных реакций;
- гидродинамический режим для быстрых и среднебыстрых реакций (в таком случае необходимо течение в режиме вытеснения);
- перенос озона для очень быстрых реакций (в этом случае лучше всего подходят контактные камеры с большой площадью поверхности раздела).

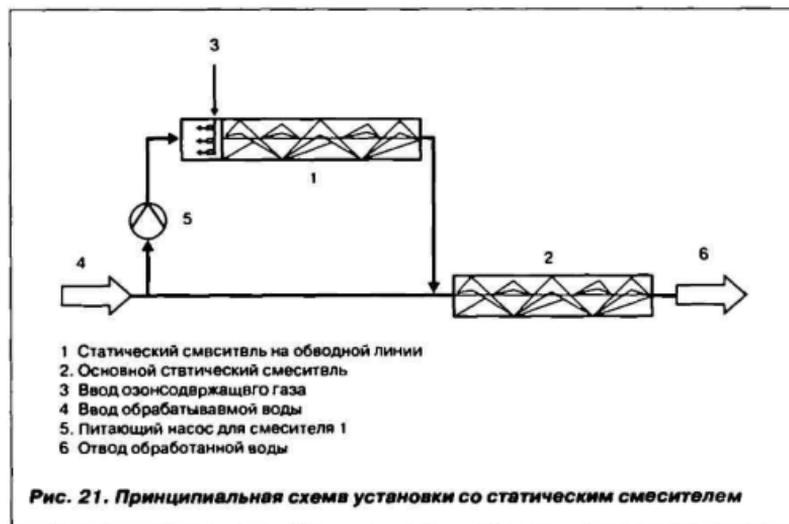


Таблица 9
Сравнение характеристик основных реакторов озонирования

Тип реактора	Диспергируемая фаза	k_L а. с. ¹	t_G ¹	Потребляемая мощность, кВт/м ³ объема реактора
Барботажная колонна с пористыми диффузорами	Газ	0,0001–0,1	< 0,2	0,01–1
Реактор с турбиной или радиальным диффузором	Газ	0,01–0,2	< 0,1	0,5–4
Насадочная колонна	Жидкость	0,005–0,02	> 0,3	0,01–0,2
Статический смеситель	Газ	0,1–10	≈ 0,5	10–200

¹ Безразмерный параметр, который характеризует удержание газа в реакторе и рассчитывается как отношение объема занимаемого газом в реакторе озонирования к общему объему этого реактора

В табл. 10 обобщены технические достоинства и недостатки каждого реактора и рекомендована наиболее подходящая область применения

4.4. Применение

Область применения озона достаточно широка благодаря его высокой реакционной способности (см. гл. 3, п. 12.4.4). В обработке воды применение озона простирается от производства питьевой воды до очистки промышленных сточных вод

4.4.1. Обработка питьевой воды

Озон применяется на различных стадиях водоподготовки в зависимости от характеристик исходной воды. Большое число примеров, иллюстрирующих применение озона, приведено в гл. 22, п. 1

■ Стадия предварительного окисления

На стадии предварительного окисления озон используется для разрушения коллоидных частиц и макромолекул, а также для улучшения параметров коагуляции-флокуляции и, следовательно, процесса отстаивания. Осветленная вода обладает лучшими показателями по мутности и содержанию органики [общий органический углерод (ООУ), предшественники образования галоформ, вещества, придающие воде вкус и запах]. Помимо окисления озон позволяет удалять водоросли, присутствующие в поверхностных водах. Он также окисляет железо и марганец в подземных водах с малым содержанием органических веществ. Применяемая на стадии предварительного окисления доза озона составляет примерно 1 мг/л

■ Стадия промежуточного или основного окисления

На данной стадии обработки воды роль озона заключается в окислении так называемых природных органических веществ. Он снимает цветность воды, загрязненной гумусовыми веществами. Озон трансформирует в биоразлагаемые вещества часто встречаемые органические соединения, придающие воде вкус и запах (на-

Таблица 10
Практические аспекты выбора реактора озонирования

Тип реактора	Преимущества	Недостатки	Область применения
Барботажная колонна с пористыми диффузорами	Относительно мягкая работа Низкая стоимость эксплуатации	Сложная конфигурация гидродинамических течений Большая высота жидкости Возможна кольматация пор	Небольшие дозы озона Медленная реакция Питьевая вода
Реактор с турбиной или радиальным диффузором	Хороший контакт озона и воды за счет лучшего перемешивания Гибкость относительно изменения расхода жидкости	Потребление энергии Обслуживание механического оборудования	Высокие дозы озона Реакция средней скорости Питьевая и сточная вода
U-образный реактор	Хороший перенос озона в воду благодаря гидродинамическим условиям Малая производственная площадь	Расходы на строительство вертикальной шахты Малые возможности в отношении изменения расхода жидкости	Быстрая реакция Питьевая вода
Насадочная колонна	Хороший перенос озона в воду за счет поршневого потока Низкая стоимость эксплуатации	Возможно засорение насадок	Быстрая реакция Промывка газа Получение озонированной воды
Статический смеситель	Хороший перенос озона и воды за счет лучшего перемешивания Низкая стоимость эксплуатации Небольшие размеры установки	Потребление энергии Очень короткое время контакта Возможна кольматация	Очень быстрая реакция Система диспергирования Питьевая и сточная вода

пример, геосмин и 2-метиллизоборнеол), пестициды (глифосат, алдикарб, пентахлорофенол и др.), фенолы, детергенты, водорослевые токсины и другие химические вещества фармацевтического и/или гормонального происхождения (например, 17- α -этинилэстрадиол). Степень преобразования органических веществ зависит от их химического строения и условий среды. Для достижения рассчитанной степени очистки может оказаться необходимым дополнительное окисление радикалами, вызываемое, в частности, добавлением перекиси водорода. Этот способ продвинутого окисления требует получения разрешения, поскольку содержание образующихся вторичных продуктов окисления может выйти за пределы установленных норм (в Европе это касается, например, пестицидов и броматов).

В общем случае озонирование позволяет уменьшить токсичность содержащихся в воде веществ и повысить их способность к биоразложению [увеличение показате-

ля по биоразлагаемому органическому углероду (БРОУ) в озонированной воде), поэтому процесс основного озонирования практически всегда дополняется биофильтрацией на ГАУ. Это позволяет завершить удаление микрозагрязнений с одновременным сокращением дозы вводимого озона. Обычно она составляет 0,5–1 г на 1 г органического углерода.

■ Стадия обеззараживания

На этой стадии обработки воды озон реагирует с микроорганизмами так быстро, что значения параметра СТ (см. гл. 3, п. 12.4.4) в большинстве случаев оказываются низкими. Данные, приведенные на рис. 22, показывают, что озон способен разрушить основные встречающиеся микроорганизмы. Несмотря на разброс значений, обусловленный различием экспериментальных условий и методик подсчета микроорганизмов (экспистирование, инфективность), видно, что

- самыми устойчивыми микроорганизмами являются простейшие, такие как цисты *Naegleria* и *Cryptosporidium*, окисление которых требует значений параметра СТ в 100 раз больше, чем, например, это необходимо для бактерии *E. coli*;
- значение СТ = 2 мг · мин/л является достаточным для разрушения 99 % бактерий, вирусов и цист *Giardia*.

Как и для любой другой химической реакции, действие озона на микроорганизмы зависит от условий реакционной среды, таких как значение pH, температура, присутствие других окисляющихся веществ и концентрации взвешенных веществ, а именно:

- величина pH обуславливает разложение озона: ее возрастание до основных значений уменьшает концентрацию растворенного озона и, следовательно, эффективность обеззараживания;

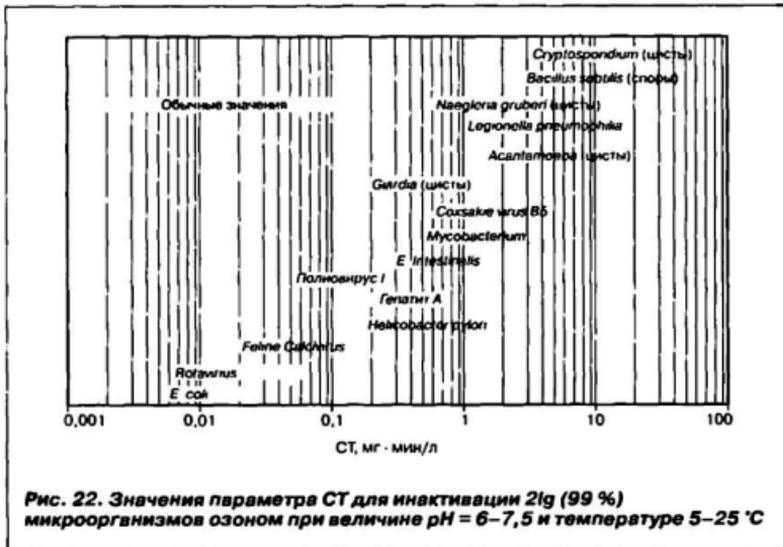
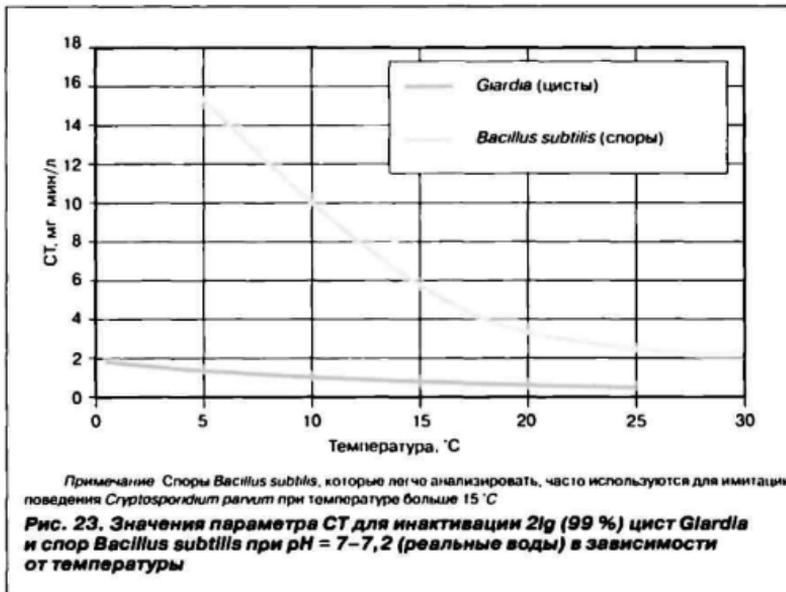


Рис. 22. Значения параметра СТ для инактивации 2lg (99 %) микроорганизмов озоном при величине pH = 6–7,5 и температуре 5–25 °С



— рост температуры увеличивает эффективность обеззараживания (рис. 23), хотя температура влияет на растворимость озона и скорость дезактивации противоположным образом,

— органические вещества вносят свой вклад в потребность воды в озоне и вступают в конкуренцию за озон с микроорганизмами (потребность в озоне — см. гл. 5, п. 4.1.4.3). Появление остаточного озона в воде наблюдается только тогда, когда количество внесенного окислителя превышает критическое значение, соответствующее немедленной потребности в озоне;

— взвешенные вещества могут защищать прикрепляющиеся на них микроорганизмы и затруднять таким образом обеззараживание (это справедливо для всех дезинфицирующих средств)

Значения параметра СТ, которые надо поддерживать, зависят от целей обеззараживания. Установленные с 1964 г. условия обработки питьевой воды определяют, что остаточная концентрация озона 0,4 мг/л в течение 4 мин (СТ = 1,6 мг·мин/л) обеспечит удаление 2,5lg цист *Giardia lamblia* при температуре 5 °C. Согласно более современным исследованиям для инактивации 1lg цист *Cryptosporidium* требуется СТ = 4 мг·мин/л при 20 °C и СТ = 10 мг·мин/л при 10 °C (данные, полученные USEPA — Управлением по охране окружающей среды в США). Но при этом применение озона может оказаться не соответствующим нормам по бромат-иону.

Образование броморганических соединений остается весьма незначительным явлением на фоне основных процессов озонирования. Конверсия бромидов в броматы может быть минимизирована следующим образом

— контроль значения pH для ограничения разложения озона до гидроксильного радикала (см. гл. 3, п. 12.4.4) и сдвига равновесия HOBr/BrO^- (рис. 24, влияние величины pH для СТ = 15).

В производстве питьевой воды основными реакторами озонирования являются камеры с отсеками. Одно отсека при времени контакта несколько минут обычно бывает достаточно для обеспечения предварительного окисления, тогда как для основного окисления и обеззараживания предпочтительнее использование камер с двумя или тремя отсеками при времени контакта 8–15 мин. Подобные реакторы рассчитываются с учетом того, что

- время пребывания в реакторе корректно описывается моделью, в которой учитывается диффузия озона в каждом отсеке реактора и поршневой поток обрабатываемой воды через весь реактор. Гидродинамическая эффективность по показателю $T10$ определяется опытным путем (см. п. 2.3.1),

- кинетические параметры (немедленная потребность в озоне, последующая скорость потребления озона с учетом возможного получения остаточной концентрации) определяются либо лабораторными тестами, либо по аналогии с действующими реакторами

Материальный баланс по озону позволяет определить значения рабочих параметров, таких как расход газа в каждом отсеке, в зависимости от геометрических характеристик и рабочих ограничений (желаемые остаточные концентрации озона для обеззараживания или окислительной обработки — рис. 26).

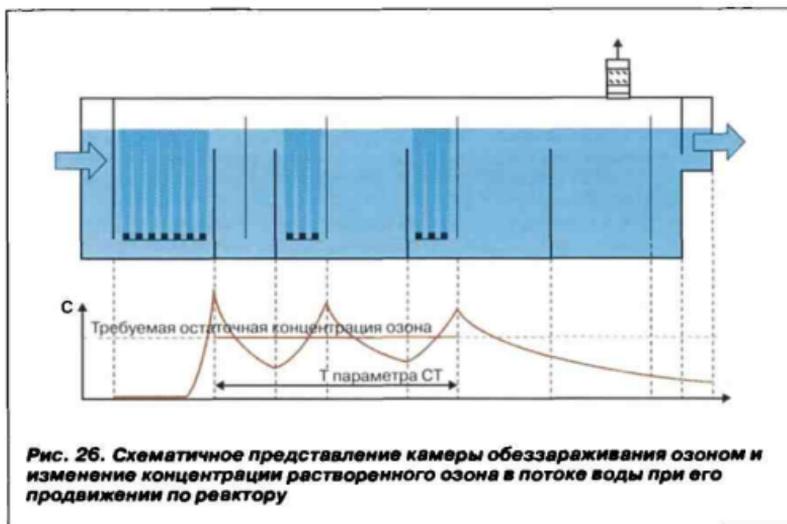


Рис. 26. Схематичное представление камеры обеззараживания озонном и изменение концентрации растворенного озона в потоке воды при его продвижении по реактору

U-образный реактор также используется на стадии основного окисления (фото 10). Реактор с радиальным диффузором, показанный на рис. 18, в основном подходит для использования на стадии предварительного озонирования.

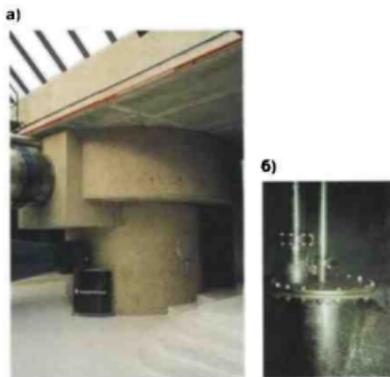
4.4.2. Городские сточные воды

Применение озона в обработке сточных вод отвечает нескольким перечисленным ниже целям

После физико-химической или биологической обработки озонирование позволяет:

- провести обеззараживание обработанных ГСВ, уменьшая при этом остаточную ХПК от 20 % до минимума, перед повторным их использованием или сбросом в защищаемые водоемы-приемники,
- осветлить и удалить 4–8 мг/л детергентов в воде при дозе озона порядка 30 мг/л (в случае ГСВ и смешанных потоков сточных вод текстильной промышленности)

Реакторы озонирования, применяемые в обработке сточных вод, в основном представляют собой камеры с отсеками такого же типа, как и для озонирования питьевой воды. При обеззараживании скорость инаktivации бактерий или вирусов высока и нет необходимости в остаточной концентрации озона. Для проведения процесса в такой камере достаточно времени



Верхняя часть колонны реактора озонирования

Головка устройства введения озона

Фото 10. Озонирование воды после нитрификации и перед фильтрацией на ГАУ, U-образный реактор. Расход 1500 м³/ч. Станция «Le Rescq» (Ивелин, Франция) компании «Lyonnaise des Eaux»

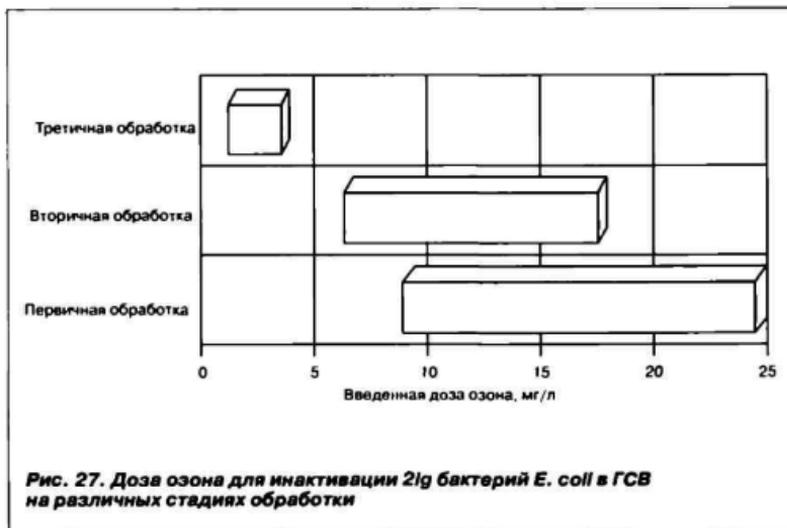


Рис. 27. Доза озона для инаktivации 2lg бактерий *E. coli* в ГСВ на различных стадиях обработки

контакта 2 мин и менее. В реакторах обеззараживания озоном можно использовать системы статического перемешивания.

Эффективность обеззараживания часто оценивается по количеству озона, требуемого для инактивации фекальных колиформ, в частности бактерий *E. coli*. Она возрастает по мере улучшения качества воды при движении по линии обработки вследствие уменьшения концентрации других окисляющихся веществ. На рис. 27 на масштабной сетке показаны величины доз озона при обработке им первичных, вторичных и третичных потоков. В большинстве случаев обрабатывать первичный поток нецелесообразно. Озонированию необходимо подвергать воду хорошего качества, по меньшей мере вторичный поток сточных вод (БПК < 20 мг/л и ВВ < 20 мг/л), иначе снижение количества бактерий и вирусов может быть весьма ограниченным (менее 2г).

В технологиях обработки ГСВ активным илом ввод озона в отведенный обводной поток уменьшает образование избыточного ила (см гл. 11, п. 4.3, способ **Biolysis O**) и одновременно приводит к улучшению характеристик биоплощев. Озон быстро действует на осадок, и для этого требуется реактор с усиленным перемешиванием, в котором создается значительная поверхность массообмена.

В обработке избыточного биологического ила, полученного после анаэробного сбраживания или аэробной стабилизации, озонирование улучшает процессы уплотнения и обезвоживания и препятствует образованию неприятного запаха.

4.4.3. Дезодорирование и очистка газов

Под дезодорированием понимают удаление пахучих соединений (см. гл. 16, п. 2). Озон используют для окисления серосодержащих веществ (сульфидов и меркаптанов, таких как сероводород и метилмеркаптан), аминов (например, этиламина и триметиламина), кетонов, спиртов и альдегидов. Существует несколько примеров такого промышленного использования озона. Озон вводится в промывающую башню (насадочную колонну), в которой протекает влажное окисление (см. рис. 20). Время контакта составляет порядка 3 с. Величина pH промывающей воды должна быть на уровне 9,0–9,5 для удаления серосодержащих веществ, альдегидов, кетонов и спиртов, и не менее 6,5 — для разложения аминов. Доза озона составляет в среднем 6–12 мг/м³ обрабатываемого газа при нормальных температуре и давлении.

4.4.4. Плавательные бассейны

Озон используется на различных этапах обработки рециркулирующей воды в плавательных бассейнах:

- при добавлении в количестве 0,5–1 мг/л в буферный резервуар на выходе из бассейна озон окисляет антропогенные загрязнения (аминированные соединения),
- если озон применяется между двумя стадиями фильтрации, он окисляет остаточные органические вещества, улучшает визуальные и органолептические характеристики воды и обеззараживает ее,
- при вводе в воду перед ее подачей в бассейн озон становится бактерицидным и противовирусным барьером.

В бассейнах чаще всего в качестве реакторов озонирования используются барботажные колонны. Системы со статическим смесителем могут быть применены для обработки воды до фильтрации.

4.4.5. Промышленные сточные воды

Применение озона для обработки промышленных стоков весьма разнообразно, о чем свидетельствуют данные по реализованным сооружениям, приведенные в табл. 11. Указанные в ней дозы озона сильно варьируются в зависимости от преследуемой цели и характеристик обрабатываемой воды.

Таблица 11

Применение озона в обработке промышленных сточных вод

Объект применения	Цель	Доза озона
Полностью оборотная вода морских аквариумов или бассейнов для разведения рыбы	Обеззараживание, окисление органического азота, повышение способности к биоразложению	–
Сточные воды гальванических цехов	Окисление цианидов	2,8 мг/г цианидов
Оборотные промывные воды в электронной промышленности	Окисление органических веществ, обеззараживание	2 мг/л
Сточные воды текстильной промышленности	Обесцвечивание, окисление поверхностно-активных веществ	50–100 мг/л
Сточные воды нефтепереработки	Окисление фенолов, продление срока работы активированного угля на последующем этапе обработки	40–400 мг/л
Сточные воды бумажной промышленности перед сбросом	Обесцвечивание, снижение уровня абсорбируемых органических галогенидов, детоксикация	100–200 мг/л
Повторно используемые сточные воды бумажной промышленности	Снижение ХПК, повышение способности к биоразложению	300 мг/л
Сточные воды резиновой промышленности	Окисление бензотиазолов, детоксикация	–
Дренажные воды от мест захоронений отходов	Обесцвечивание, снижение ХПК	От 500 мг/л до 2 г/л
Сточные воды химической промышленности перед сбросом или повторным использованием	Дезодорирование, окисление пестицидов, обесцвечивание, повышение способности к биоразложению, снижение ХПК	От 500 мг/л до нескольких граммов на литр

Для каждого случая применения озона реактор следует выбирать в зависимости от скорости реакций и характеристик воды. Например, это может быть насадочная колонна для обеззараживания исходной или повторно используемой воды в бассейнах для разведения рыбы, система со статичным смесителем для обесцвечива-

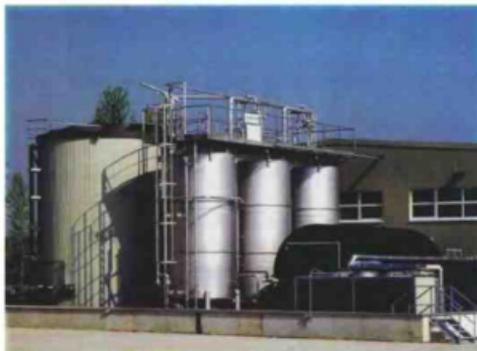


Фото 11. Установка озонирования с рядом последовательных реакторов с радиальным диффузором

ния воды с малым содержанием взвешенных частиц или реактор с радиальным диффузором для обработки сточных вод при значительном времени контакта (фото 11) Реакторы рассчитываются на основе изучения кинетических параметров, проводимого в непрерывном или периодическом режиме

4.4.6. Применение в промышленности

Реакционная способность озона используется на различных этапах промышленного производства

— отбеливание бумажной массы (см гл 2, п 5 6 1 2),

- очистка (отбеливание) каолина и карбоната кальция,
- синтез химических продуктов, ароматизаторов, органических кислот и др .
- очистка серной и фосфорной кислот,
- отбеливание тростникового сахара,
- кондиционирование пищевых продуктов

4.5. Каталитическое озонирование: способ Tocsata

Способ **Tocsata** предназначен для частичного или полного разложения **растворенной органической части ХПК, которая трудно окисляется биологическим путем** Речь идет

- или об остаточном загрязнении после биологической обработки,
- или о более или менее концентрированных сточных водах, содержащих токсичные загрязнители (антибиотики, пестициды и др.), запрещающие всякую биологическую обработку

Способ **Tocsata** — это процесс гетерогенного катализа, основанный на генерации в реакционной среде с озоном вторичного, более мощного окислителя (неустойчивых соединений, образующихся в результате реакции озона с твердым катализатором) Процесс протекает при температуре и давлении, близких к комнатным Он принадлежит к группе процессов, называемых углубленным окислением (см гл 3, п 12 4.9) Окисление органических веществ происходит в результате контакта трех фаз обрабатываемой воды, твердого катализатора и озонсодержащего газа.

Каталитическое озонирование обеспечивает надежное удаление ХПК без реакционных ограничений, каковые обычно встречаются в процессе озонирования, когда необходима глубокая очистка По сравнению с простым озонированием каталитическое имеет два благоприятных эффекта (рис 28)

- увеличение скорости удаления ХПК и потребности в озоне на количество удаленной ХПК в первой фазе окисления, когда активен только озон,

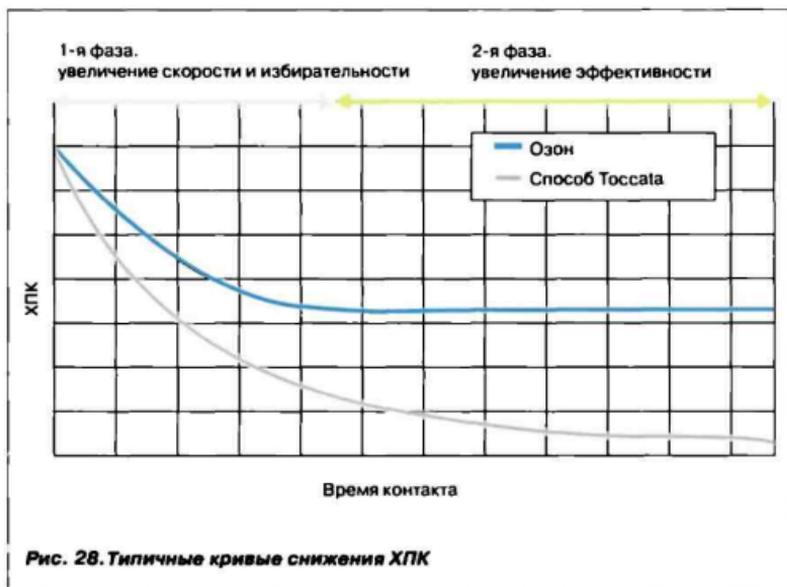


Рис. 28. Типичные кривые снижения ХПК

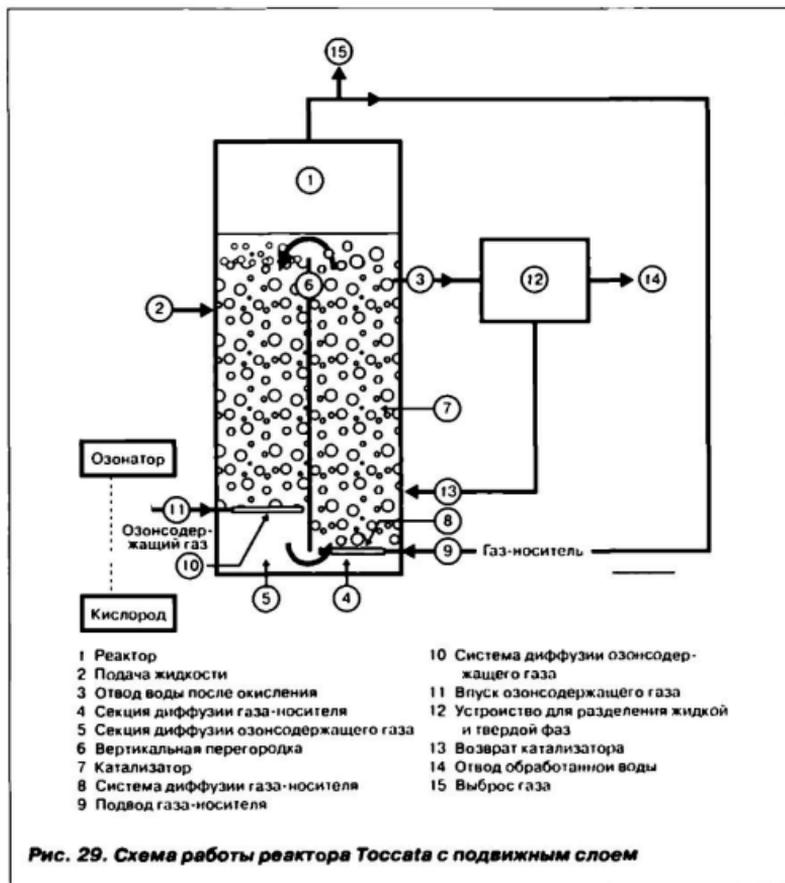
— повышение эффективности процесса окисления во второй фазе, на которой озон может вообще не потребоваться в отличие от режима обычного озонирования.

С химической точки зрения окисление органических веществ каталитическим озонированием не отличается от окисления обычным озонированием: образуются вещества с меньшим молекулярным весом, полярной химической связью и насыщенные кислородом типа альдегидов, кетонов и карбоновых кислот.

При каталитическом окислении озоном часть неразлагаемой живыми организмами ХПК приобретает способность к биоразложению, поэтому вполне целесообразно сочетать каталитическое озонирование с последующей биологической обработкой (например, на установке **Biofor**).

Компания «Дегремон» разработала катализаторы двух видов, адаптированных к различным типам реакторов в зависимости от области применения:

— порошок со средним размером гранул несколько сотен микрометров; при его использовании следует создать однородную суспензию катализатора в жидкости в реакторе «с подвижным слоем», в который затем подается озон в виде мелких пузырьков (рис. 29 и фото 12). Реактор состоит из двух сообщающихся отсеков, между которыми непрерывно циркулирует суспензия катализатора под действием впускаемого газа-носителя, обычно воздуха, в один из отсеков. Озонирование происходит во втором отсеке при подаче в него противотоком реактивного озонсодержащего газа. Таким образом, поток озона попадает в зависимости от скорости реакции в сточной воде без учета гидравлического поддержания катализатора во взвешенном состоянии. После отделения твердой фазы от жидкости (отстаивание, микрофильтрация, гидроциклон, мембрана и т. д.) катализатор используется повторно в непрерывном режиме;

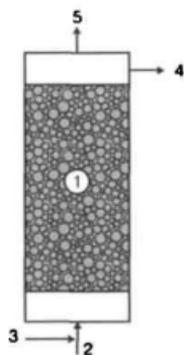


— частицы диаметром несколько миллиметров, предназначенные для классического аппарата с неподвижным слоем загрузки, с восходящим потоком воды и озонсодержащего газа (рис 30)

Способ **Тоската** может применяться для обработки промышленных сточных вод различного происхождения в целях более интенсивного окисления (см. примеры на рис 31) В противоположность обычному озонированию или процессам окисления радикалами, таким как O_3/H_2O_2 или O_3 /ультрафиолет, качество обрабатываемой воды оказывает относительно малое влияние на процесс каталитического окисления, поскольку последний контролируется активностью катализатора и не подвержен ингибирующему влиянию улавливающих свободные радикалы веществ, часто присутствующих в промышленных сточных водах. Из этого следует, что по сравне-

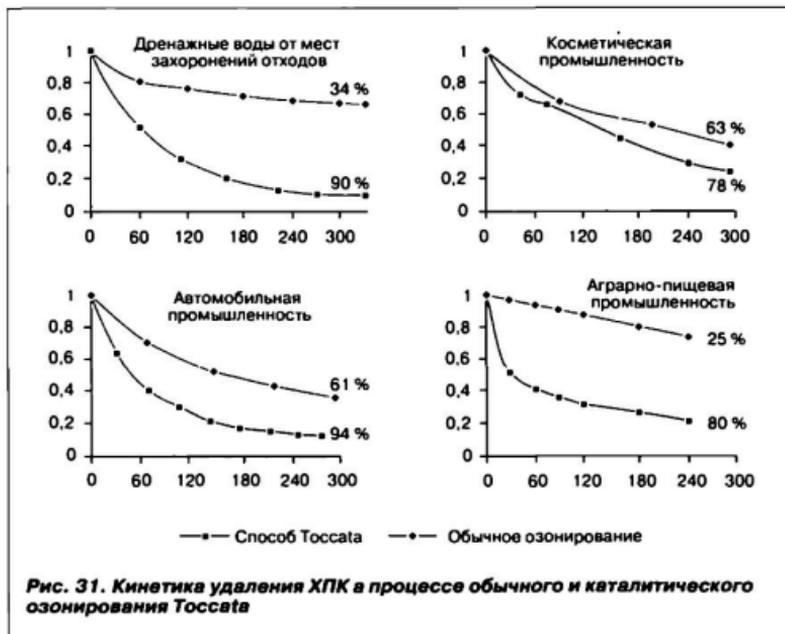


Фото 12. Аппарат для реализации способа Тоссата с катализатором в виде порошка



- 1 Слой катализатора
- 2 Поддача воды
- 3 Подвод озонсодержащего газа
- 4 Отвод обработанной воды
- 5 Выброс газа

Рис. 30. Принципиальная схема работы реактора Тоссата с неподвижным слоем



нию с традиционным озонированием активность и селективность каталитической системы озонирования позволяет существенно уменьшить количество подаваемого озона при таком же снижении ХПК (см. примеры в табл. 12).

Таблица 12

Дозы озона для снижения ХПК при различных способах озонирования

Промышленные сточные воды	Уменьшение по ХПК, %	Доза озона, г на 1 г удаленной ХПК	
		Обычное озонирование	Способ Toccat
Дренажные воды от мест захоронений отходов	34	14,1	2,3
Косметическая промышленность	63	3,8	3,2
Автомобильная промышленность	61	3,3	2,8
Сельское хозяйство	25	21,5	4,3

5. Другие способы окисления и обеззараживания

5.1. Перманганат калия

В промышленности перманганат калия получают из диоксида марганца (минерал пиролюзит) следующим образом

- сначала диоксид окисляют до манганата сухим или влажным способом,
- затем манганат окисляют до перманганата с помощью электролиза.

В зависимости от происхождения исходного минерала в конечном продукте могут в следовых количествах находиться металлические примеси (мышьяк, кадмий, хром, ртуть, никель, свинец, сурьма, селен) Минимальное содержание перманганата калия в соответствии с нормами составляет 98,5 % по массе. В большинстве случаев он представляет собой мелкие темно-фиолетовые кристаллы. Может храниться при комнатной температуре в закрытых емкостях, которые в соответствии с действующими правилами должны быть либо из защищенной стали, либо из пластмассы. Перманганат растворяют в воде с получением раствора концентрацией примерно 3 г/л, который затем подают в обрабатываемую воду с помощью дозирующего насоса.

Перманганат калия относится к достаточно дорогим реагентам. В основном его используют для предварительной обработки питьевой воды в целях удаления растворенных железа и марганца (см гл 3, п. 12 4 5, и гл 22, пп. 2 1.2, 2 2.2). Причем для удаления марганца он более эффективен, чем хлор. Перманганат калия применяют также в следующих случаях.

- для предотвращения развития водорослей в резервуарах с исходной водой,
- для предварительного окисления природных вод в целях снижения цветности, удаления привкуса и запаха или минимизации образования тригалогенметанов на последующей стадии хлорирования

Применение данного реагента для окисления органических веществ малораспространено, так как он достаточно селективен по отношению к ним. В связи с этим количество вводимого перманганата следует рассчитывать в зависимости от состава обрабатываемой воды, поскольку передозировка приведет к окрашиванию ее в розовый цвет.

5.2. Бром

Химическая формула брома Br_2 . В нормальных условиях по температуре и давлению он представляет собой рыже-коричневую жидкость. Она летуча и испускает удушливые, раздражающие и токсичные пары. При растворении в воде бром ведет себя как хлор, за исключением того, что при высоких значениях pH находится в форме молекулярного брома и бромноватистой кислоты. Согласно разного рода окислительно-восстановительным потенциалам окислительная способность брома по сравнению с хлором оказывается ниже в кислой среде, такой же — в нейтральной и более высокой — в щелочной среде. Кроме того, бромамины менее стабильны, чем неорганические хлорамины.

Благодаря своим антисептическим и противоводорослевым свойствам бром используется для обеззараживания воды в плавательных бассейнах. Особенно он подходит для случаев, когда нежелателен раздражающий хлорный запах, например

в горячих ваннах. В воду бром вводят в виде таблеток, содержащих 70 % активного соединения, через дозирующее устройство. Дозировка составляет порядка 1 г/м^3

5.3. Перекись водорода

Техническая перекись водорода выпускается в виде раствора с массовой концентрацией 35, 50 и 70 % (см. гл. 3, п. 12.4.6). Она представляет собой бесцветную слабозвязкую жидкость без запаха. Для предотвращения разложения в нее добавляют минеральные стабилизаторы. При правильном хранении и использовании — емкости и дозирующие устройства из нержавеющей стали, хранение в прохладном месте в отсутствие легко воспламеняющихся веществ и источников энергии — разложение не превышает 1 %.

В обработке воды перекись водорода применяют

- для уменьшения количества выделяющегося в канализационных потоках сероводорода;
- для удаления цианидов и сульфидов из промышленных сточных вод;
- для обработки питающих потоков в биологических системах очистки при вспучивании ила;
- для промывки газов и удаления из них оксидов азота и серы и меркаптанов, образующихся в промышленных цехах;
- для обеззараживания охлаждающей воды и ограничения разлития в ней бактерий и водорослей.

5.4. Надуксусная кислота

На рынке надуксусная кислота (гидроперекись ацетила) предлагается в виде концентрированных (около 40 %) и разбавленных (0,4–2,5 %) растворов. Растворы стабилизируются различными способами для сохранения их окислительных свойств в течение 8–10 мес в условиях хранения, сходных с рекомендованными для хранения перекиси водорода.

Из-за высокой стоимости надуксусная кислота может быть использована при обработке воды только как временная мера в следующих случаях

- для обеззараживания городских сточных вод в купальный сезон;
- для обеззараживания шламов (осадков);
- для ограничения разбухания илов.

Пока получено немного данных, характеризующих эти процессы. Известно, что введение 2–4 мг надуксусной кислоты на 1 л обрабатываемой жидкости позволяет удалить в городских стоках более 90 % общих колиформ. С помощью этой кислоты, при дозе более 250 мг/л, можно в течение 1–4 нед провести инактивацию сальмонелл в избыточных активных илах.

6. Обеззараживание ультрафиолетовым излучением

Как было показано (см. гл. 3, п. 12.4.8), обеззараживание ультрафиолетовым излучением (УФИ) имеет следующие преимущества

- быстрая инактивация болезнетворных бактерий;
- почти полное отсутствие побочных продуктов;

- высокая эффективность против большинства видов бактерий и цист простейших.
- Это делает УФИ одним из лучших инструментов для обеззараживания городских и промышленных сточных вод, а также питьевой воды

6.1. Основные принципы и терминология

6.1.1. Терминология

Падение численности. разница между числом микроорганизмов до и после обеззараживания. Падение численности обычно выражается десятичным логарифмом

Балласт электромагнитный и/или электронный элемент, предназначенный для включения разрядной лампы и контроля ее работы

«Биопроба» биологический тест на обеззараживание, позволяющий оценить возможности системы обеззараживания (в уменьшенном или промышленном масштабе) В тесте «Биопроба» используется процедура введения микроорганизмов на входе в систему обеззараживания.

УФИ. электромагнитное излучение с длиной волны в интервале 100–400 нм.

УФИ-С электромагнитное излучение с длиной волны 200–280 нм, соответствующее бактерицидной области.

Доза УФИ-С, мДж/см². энергия УФИ-С, применяемая или необходимая для данного значения падения численности данного микроорганизма. Доза УФИ-С определяется потоком УФИ-С за время облучения

Поток УФИ-С, Вт/см². мощность излучения, полученная сферой бесконечно малого размера. Говоря об УФИ-реакторах, часто путают понятия интенсивности (см ниже) и потока.

Кварцевая трубка: трубка, защищающая УФИ-лампу от контакта с водой и пропускающая УФИ.

Интенсивность УФИ-С (энергия на площадь, Вт/см²) поток УФИ-С, полученный бесконечно малой поверхностью. Очень часто используют также термин «облученность».

Модуль. элемент системы, состоящий из множества УФИ-ламп, смонтированных в определенном порядке на одной раме. Каждый модуль имеет собственное электропитание.

Линия модулей группа модулей, расположенных вдоль всего канала, в котором осуществляется УФИ-обработка воды.

Закрытый реактор: УФИ-реактор в форме трубки, работающий под давлением.

Открытый реактор: УФИ-реактор, расположенный в канале с постоянным уровнем.

Проницаемость УФИ-С, % отношение между испущенным излучением и излучением, переданным через слой воды (1–5 см). В обработке сточных вод данное измерение проводится на фильтрованной (прозрачность с фильтрацией) и нефилтрованной (прозрачность без фильтрации) пробах. Следует следить за репрезентативностью проб по времени (в течение суток, месяца).

6.1.2. Действие УФИ на ДНК и РНК

Нуклеиновые кислоты — дезоксирибонуклеиновая (ДНК) и рибонуклеиновая (РНК) — являются фундаментальными элементами в репродуктивной системе всех микроорганизмов. В гл. 3, п. 12.4.8, было показано, что нуклеотиды, составляющие

ДНК и РНК, очень сильно поглощают УФИ с длиной волны в интервале 220–290 нм с максимумом 260 нм. При этом нуклеотиды повреждаются, и в них блокируется процесс воспроизводства клеток. Облученные клетки живут еще некоторое время, но неспособными к воспроизводству и заражению потенциального хозяина.

6.1.3. Необходимые дозы

Расчетная доза излучения назначается в зависимости от микроорганизмов и целей обеззараживания (простое снижение численности или максимально возможное). Ее можно определить на основании экспериментальных данных или, особенно при обработке сточных вод, с помощью теста на инактивацию (см. п. 6.3).

■ Расчетная доза в зависимости от микроорганизма

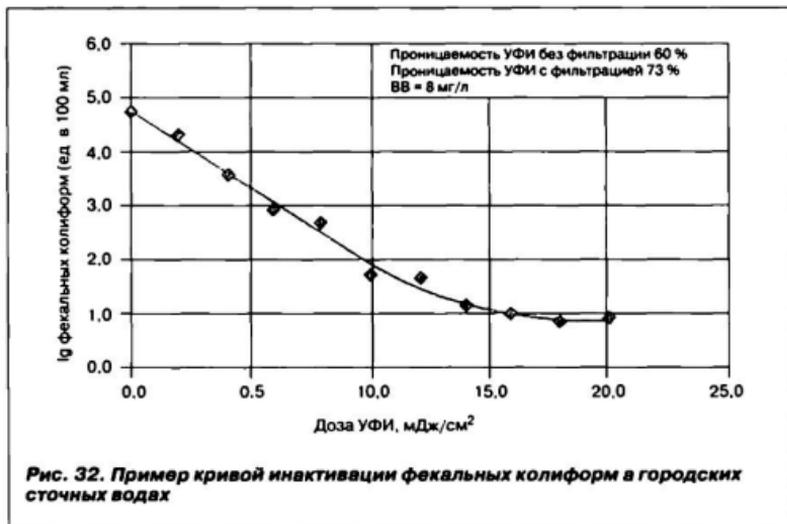
При конкретном снижении численности доза излучения меняется в зависимости от микроорганизма. В лабораторных условиях легко получить кривые инактивации для некоторых микроорганизмов типа фекальных и общих колиформ (например, *E. Coli*), колифага MS2 (рис. 33). Для других микроорганизмов, например для сальмонеллы, вируса полиомиелита или гепатита, это сделать гораздо сложнее. Поэтому при определении расчетной дозы излучения для таких микроорганизмов часто пользуются сравнительной таблицей (табл. 13).

■ Расчетная доза излучения в зависимости от максимально допустимого значения в выбросе

С ужесточением норм качества воды доза излучения увеличивается. Зависимость нелинейна для сточных вод, поскольку в них присутствуют взвешенные вещества, которые могут сильно экранировать и даже инкапсулировать микроорганизмы (рис. 32). Чем больше размер и концентрация взвешенных частиц, тем сложнее достичь требуемого качества воды (например, норма «Title 22» из законодательства штата Калифорния, США).

Таблица 13
Допустимые соотношения дозы облучения в зависимости от микроорганизма

Микроорганизм	Относительная доза
<i>Escherichia coli</i>	1,0
<i>Streptococcus faecalis</i>	1,3
<i>Salmonella</i> spp.	0,9–1,2
<i>Bacillus subtilis</i>	2,1
<i>Bacillus subtilis</i> spores	3,5
Polio virus	1,5–3,5
Coxsackie virus	3,5–4,5
Echo virus	3,2–3,6
Hepatitis A virus	1,2–2,1
Колифаг MS2	4,1–7,4



■ Расчетная доза излучения в зависимости от требуемого снижения количества микроорганизмов (lg)

Доза определяется на основании кривых инактивации референтных микроорганизмов. Когда речь идет о сточных водах, нужно удостовериться, что заданное снижение численности микроорганизмов достижимо в присутствии взвешенных частиц.

6.2. Типы источников УФ

В табл. 14 даны основные характеристики ламп, являющихся источниками УФ.

6.3. Биологический тест «Биопроба»

«Биопроба» — это тест, оценивающий УФ-реактор. Проводится в два этапа. На первом, лабораторном, этапе определяется отклик микроорганизмов на различные дозы УФ. Микроорганизмы облучаются ультрафиолетом в течение определенного времени при помощи коллиматора, позволяющего генерировать точно измеримые дозы излучения (рис. 34). Тип микроорганизма выбирается в зависимости от условий линейности, от устойчивости к УФ, от сохранения и воспроизводимости. Типичная кривая изображена на рис. 33.

Второй этап «Биопробы» проводится на производственной площадке. Он состоит в определении эффективности системы обеззараживания при разных расходах системы УФ-обеззараживания. На этом этапе используются те же микроорганизмы, что и на предыдущем. Измерение полученного уровня инактивации (логарифм снижения численности) позволяет с помощью данных теста с коллиматором определить реальную дозу УФ, которую выдает данная система обеззараживания. На рис 35 приведен пример. Полученная кривая позволяет на основании значений

Таблица 14
Характеристики основных УФ-ламп

Тип лампы	Низкое давление	Низкое давление, высокая интенсивность	Среднее и высокое давление	Вспышка	Экцимер
Спектр ¹	МС	МС	РС	РС	МС
Состав	Благородные газы + ртуть	Благородные газы + ртуть или металлических соединения	благородные газы + ртуть	Ксенон	Благородные газы + галиды
Мощность УФ-С, Вт	13–27	26–300	150–500	100–500	100–1000
Плотность УФ-С, Вт/см ²	0,2	0,8	7	20	10
КПД, % ²	30–35	30–35	8–10	8–10	8–10
Рабочая температура, °С	55–65	105–200	600–700	800–1000	800–1000
Срок службы, ч	8000–13 000	8000–13 000	5000–6000	1000–3000	4000–6000
Сравнительная стоимость ⁴	1	1	1	2	3

¹ Монохроматический (МС) или полихроматический (РС)

² На сантиметр длины дуги

³ Отношение энергии УФ-С к энергии, подаваемой на всю лампу + балласт

⁴ Сравнительная стоимость при эквивалентной мощности УФ-С.

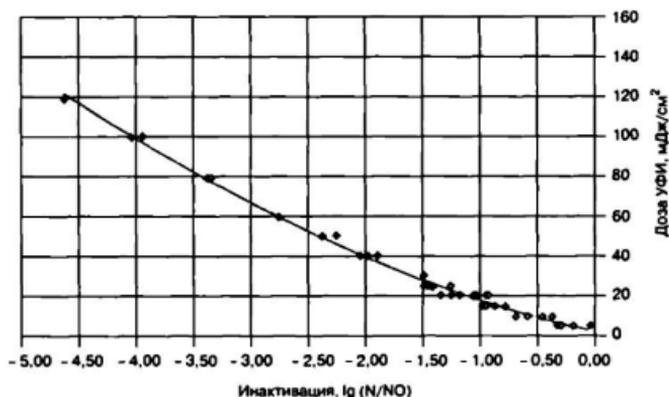
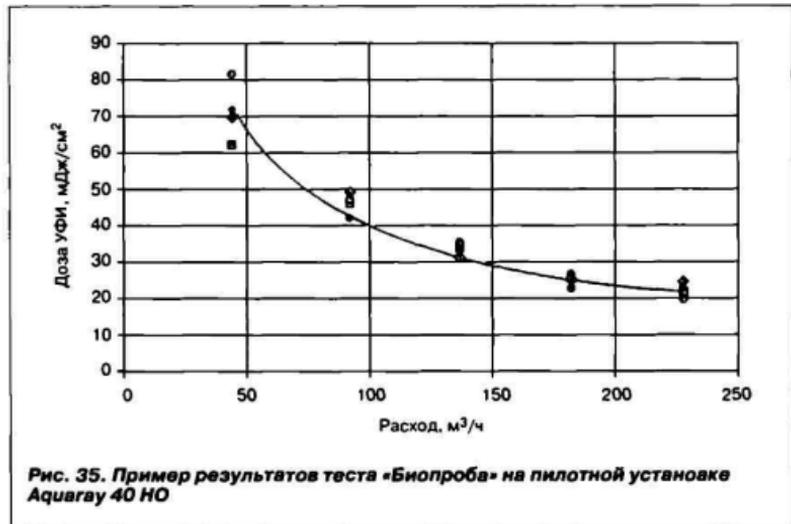
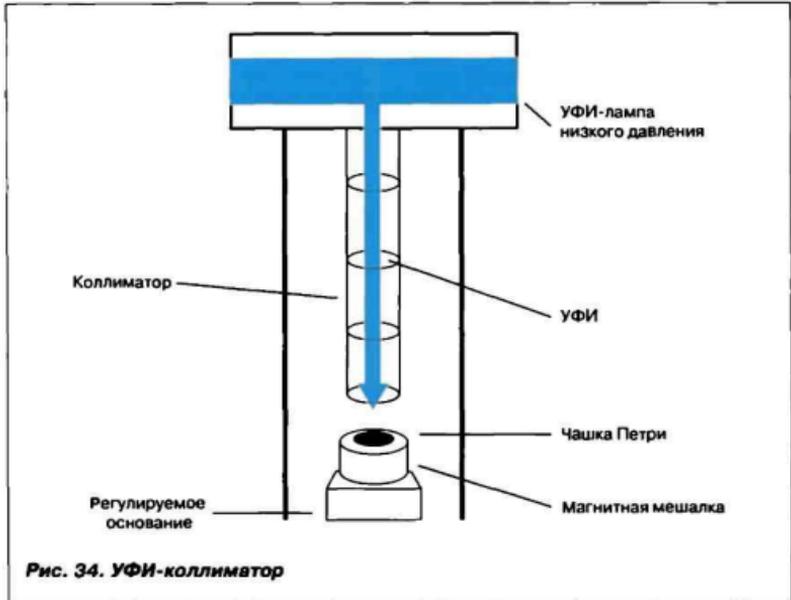


Рис. 33. Тест на инактивацию колифагов MS2 с использованием коллиматора



расхода обрабатываемой воды и дозы излучения подсчитать необходимое число реакторов или модулей

6.4. Принципы расчета

УФИ-реактор характеризуется потерей напора и дозой УФИ, которую он способен выдать при данном расходе обрабатываемой воды

Следует учитывать следующие виды потерь напора в реакторе:

- при прохождении через ряд модулей или реакторов (определяется в процессе экспериментов),
- обусловленная наличием системы контроля уровня в открытых каналах (с фиксированным или подвижным сливным порогом);
- связанная с системой успокоения потока на входе в модули или реакторы

Величина выдаваемой реактором дозы УФИ может быть получена тремя способами: усредненный расчет, дискретный расчет и с помощью теста «Биопроба».

6.4.1. Усредненный расчет дозы УФИ

Доза излучения выражается как произведение интенсивности УФИ и времени пребывания воды в зоне обработки. Если такой подход достаточно прост, когда речь идет о единственном источнике УФИ и микроорганизм при этом неподвижен, то для реакторов, содержащих множество источников и имеющих динамический характер, ситуация значительно усложняется. Следует также учитывать физические параметры износа ламп (продолжительность работы, количество циклов включения/выключение).

Средняя доза излучения, выдаваемая системой обеззараживания, выражается следующим соотношением:

$$\text{Доза} = I_{\text{ср}} \cdot t \cdot \theta/t \cdot F_h \cdot F_p \cdot F_r$$

■ Расчет средней интенсивности реактора $I_{\text{ср}}$

Среднюю интенсивность реактора можно получить на основании расчета, в котором учитываются следующие элементы: размеры реактора, количество и мощность ламп, расстояние между лампами, диаметр и природа кварцевых трубок и, наконец, прозрачность воды. Она может быть получена для разных длин волны в целях точной взаимной адаптации характеристик ламп и воды (при использовании ламп среднего давления).

■ Гидравлическое время пребывания t

Речь идет о теоретическом времени пребывания воды в зоне обработки, в течение которого присутствующие в ней микроорганизмы будут подвергаться УФИ. Оно равно объему одного или нескольких реакторов, деленному на гидравлический расход.

■ Гидравлические коэффициенты θ/t и F_h

Коэффициент θ/t представляет собой отношение среднего времени пребывания, измеряемого путем трассировки, к теоретическому гидравлическому времени пребывания. Данный коэффициент характеризует режим поршневого потока в одном или в нескольких реакторах. Его значение варьируется от 0,85 до 1.

Коэффициент F_h учитывает радиальное перемешивание внутри реактора. Сильное радиальное перемешивание позволяет менять «уровни облученности» микроорганизмов и таким образом повышает эффективность реактора. Его значение варьируется от 0,5 до 1.

■ Коэффициент износа ламп F_p

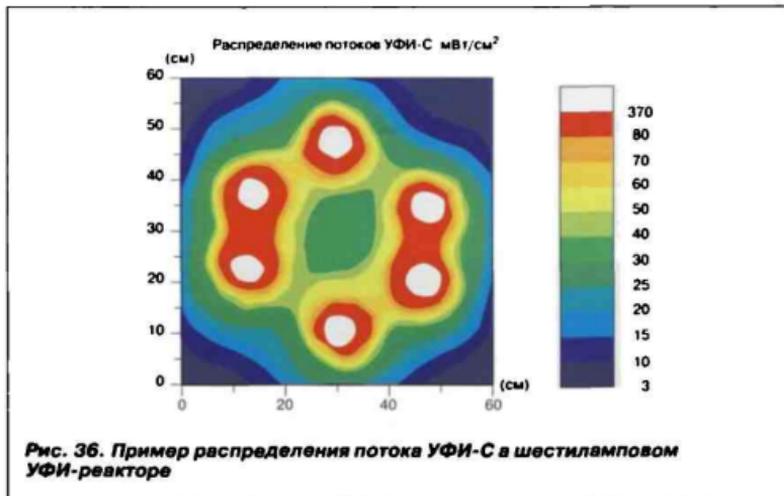
Мощность УФ-лампы уменьшается с увеличением количества отработанных ею часов. Причиной этому служат главным образом окисление загрязняющих веществ, находящихся в корпусе лампы, и обеднение электродов. Фактор износа ламп равен отношению мощности УФ-лампы, выдаваемой после N часов работы, к мощности, измеряемой после 100 ч работы. Значение коэффициента износа F_p в конце срока работоспособности лампы — это значение F_p , при котором принимается решение о ее замене. Этот коэффициент варьируется от 0,65 до 1.

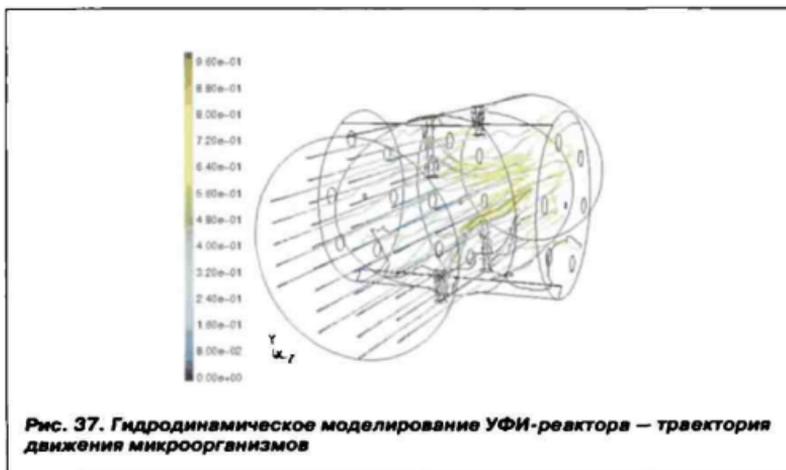
■ Коэффициент загрязнения F_t

Коэффициент загрязнения учитывает воздействие элементов, которые осаждаются на поверхности кварцевых трубок, защищающих лампы. Наиболее часто встречаемые загрязнения — это жиры, соединения на основе кальция и соли металлов. Загрязнение более явно проявляется с увеличением рабочей температуры лампы. Его можно уменьшить с помощью чистки, частота которой зависит от характера использования. Значение коэффициента загрязнения варьируется от 0,5 до 0,9.

6.4.2. Дискретный расчет дозы УФ

Доза УФ, получаемая в реакторе, также может быть рассчитана на основании связи между полем излучения (распределение потока УФ в реакторе) и траекториями микроорганизмов, пересекающими реактор. В расчете поля УФ учитываются мощность лампы, ее спектр, коэффициенты поглощения кварцевых труб и воды (рис. 36). Траектории микроорганизмов определяются при помощи гидравлического моделирования, дающего информацию также и о поле скоростей (рис. 37). Доза УФ, полученная микроорганизмом, определяется суммированием бесконечно малых доз на протяжении всей траектории. Рассматривая множество микроорга-





низмов, можно получить распределение доз, позволяющее на основании кривых инактивации (см. рис. 33) определить рабочие характеристики реактора

6.4.3. Определение дозы УФИ с помощью теста «Биопроба»

Кривая, получаемая с помощью теста «Биопроба», также позволяет рассчитывать систему УФИ-обеззараживания. Для тестов по одному или нескольким микроорганизмам кривую строят исходя из зависимости

Доза УФИ модуля или реактора = f (расход обрабатываемой воды)

6.5. Типы реакторов

6.5.1. Закрытые реакторы малых размеров

Закрытые реакторы малых размеров обычно располагаются на напорной линии после насоса. Они состоят из следующих компонентов

— трубчатая камера с двумя соединительными фланцами, расположенными перпендикулярно камере.



Фото 13. Два установленных последовательно реактора Aquaviva H2O. Производительность 2000 м³/ч

- одна или несколько ламп с кварцевыми трубками, расположенными параллельно оси камеры;
 - система контроля и управления работой ламп;
 - система автоматической чистки кварцевых трубок
- Для закрытых реакторов малых размеров характерны
- высокая скорость потока и, следовательно, небольшие габариты;
 - простота установки;
 - потери напора меньше 0,5 м вод. ст

6.5.2. Закрытые линейные реакторы средних и больших размеров

Закрытые линейные реакторы средних и больших размеров устанавливаются на линиях гравитационного потока (выход из фильтра) или на напорных линиях (выход из накопительного резервуара или насоса). Они состоят из следующих компонентов

- трубчатая камера с двумя соединительными фланцами на концах;
- одна или несколько ламп с кварцевыми трубками, расположенными перпендикулярно оси камеры;
- система контроля и управления работой ламп;
- система автоматической чистки кварцевых трубок.

Для закрытых линейных реакторов средних и больших размеров характерны.

- высокая скорость потока благодаря высокой средней интенсивности и, следовательно, небольшие габариты;
- простота установки;
- относительно низкие потери напора (меньше 35 см вод. ст.).

6.5.3. Открытые реакторы

Открытые реакторы предназначены для обработки сточных вод, но также, при значительных расходах, могут использоваться и для питьевой воды.

В их состав входит:

- один или несколько каналов,
- множество модулей, расположенных последовательно или параллельно в канале (каналах); каждый модуль состоит из нескольких ламп и кварцевых трубок, размещенных параллельно или перпендикулярно потоку;
- система контроля и управления работой ламп;
- система автоматической чистки кварцевых трубок;
- резервуар для химической очистки модулей (если реактор используется в технологической линии обработки ГСВ),
- устройство для регулирования уровня воды в канале.

Для открытых реакторов характерны:

- течение гравитационного типа;
- удобный доступ к лампам, кварцевым трубкам и системам чистки;
- возможность извлечения модуля без остановки течения,
- незначительная потеря напора (порядка 0,5 м вод. ст.).

6.6. Реакторы для обработки питьевой воды

■ Условия применения

Проницаемость воды должна быть не менее 85 %.

■ Тип реактора и размещение

Для обработки питьевой воды в целях обеззараживания (см. также гл. 22, п. 1.6) в зависимости от ее расхода используют закрытые напорные или линейные реакторы. Количество камер реактора также определяется в зависимости от расхода обрабатываемой воды, а их размещение (последовательно или параллельно) — исходя из максимально допустимой потери напора и желательной гибкости работы. Необходимо предусматривать дополнительную линию обработки, которая позволит обеспечивать техническое обслуживание камер реакторов (замену ламп, кварцевых трубок или соединений) без прерывания процесса обеззараживания.



Фото 14. Два установленных последовательно реактора Aquaviva H2O. Производительность 2000 м³/ч

Реактор **Aquaviva H2O** (фото 14) представляет собой типичный реактор В его состав входит шесть УФ-ламп среднего давления, и с помощью двух последовательно установленных реакторов можно обрабатывать до 2000 м³/ч питьевой воды с дозой облучения 40 МДж/см². Реактор располагает системой полного контроля с датчиком УФ. Датчик легко настраивается с помощью лампы и позволяет в любой момент контролировать выдаваемую дозу и модуляцию тока дугового разряда в соответствии с реальным расходом и таким образом минимизировать износ ламп.

■ Системы чистки

Для нормальной работы реактора необходима систематическая чистка ламп. В этих целях должна быть предусмотрена легкодоступная механическая система чистки кварцевых трубок, которая обеспечит легкость технического обслуживания, как это сделано в реакторе **Aquaviva H2O**. Ее следует дополнить системой химической чистки на месте работы реактора, частота проведения которой будет определяться в процессе работы.

6.7. Реакторы для обработки сточных вод

6.7.1. Условия применения

Перед УФ-обеззараживанием необходимо провести предварительную обработку, которая, кроме отдельных случаев (сильно разбавленная вода), должна состоять из биологической обработки и третичной доочистки. Характер такой предварительной обработки (остаточная концентрация ВВ, прозрачность воды и т.д.) будет зависеть от требуемой степени обеззараживания. Обычно обеззараживание не проводится, если пропускная способность ниже 35 %, а содержание взвешенных веществ выше 45 мг/л. К тому же при указанных значениях снижается эффективность обеззараживания (инактивация не более 2lg и абсолютный уровень свыше 2000 колифагов в 100 мл воды). Для получения стандартных результатов (инактивация 3lg, от 100 до 200 колифагов в 100 мл воды) пропускная способность воды должна быть более 45 %, а содержание взвешенных веществ менее 30 мг/л. В случае когда требуются более высокие результаты обеззараживания, необходимо провести такую предварительную обработку, после которой пропускная способность воды будет выше 55 %, а содержание взвешенных веществ менее 5 мг/л.

Необходимо также следить за содержанием железа в подлежащей обеззараживанию воде, которое может сказаться на пропускной способности воды и особенно на скорости загрязнения кварцевых трубок.

6.7.2. Типы реакторов

Широкое применение находят открытые реакторы. Вертикальное положение ламп серии **Aquaray 40** обеспечивает очень легкий доступ к балластам в верхней части (все электросоединения находятся над уровнем воды), к лампам и защитным трубкам (менее 5 мин необходимо на замену лампы **Aquaray 40** или **40 HO**), а следовательно, легкость и быстроту в техническом обслуживании.

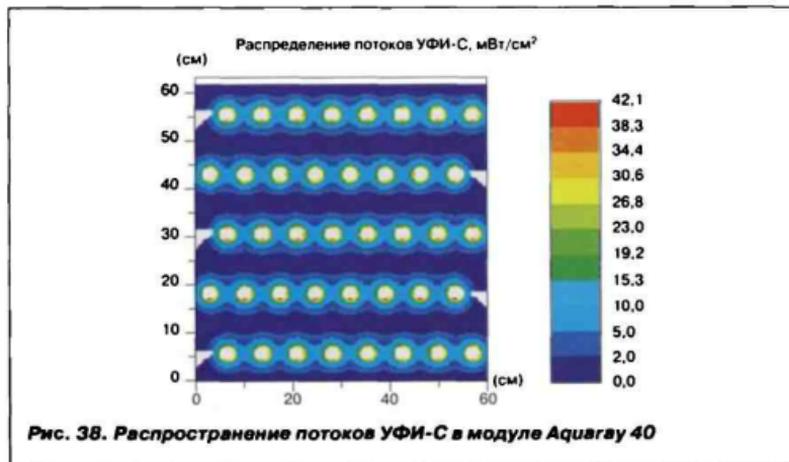




Фото 15. Установка обеззараживания с использованием модулей Aquaray 40 (очистные сооружения в г. Виндзор, штат Калифорния, США)

Недавний переход от ламп низкого давления и низкой интенсивности к лампам низкого давления и высокой интенсивности (НО) (см п 6.2, табл. 14), а также улучшение гидравлики модулей за счет установки дефлекторов (рис. 38) обеспечивают выигрыш в габаритах установки и исключительное снижение инвестиционных затрат

Так, на очистных сооружениях в городе Виндзор (фото 15), построенных в 1999 г., для обеззараживания понадобилось 32 модуля Aquaray 40. За счет упомянутых выше совершенствований в 2003 г. их осталось лишь 16, а в 2005 г. — всего лишь 6 модулей тех же размеров. На фото 15 видны люки, обеспечивающие доступ



Фото 16. Сооружения «Свтр Сгрек». Производительность 341 000 м³/сут с дозой УФД 30 мДж/см²



Фото 17. Модуль Aquavay 40 HO – механическая система очистки + дефлектор

к балластам и лампам, а в верхней части снимка — двойной модуль, поднятый из канала для технического обслуживания.

На фото 16 показаны очистные сооружения «Camp Creek» с 48 модулями Aquavay 40 HO, распределенными по трем каналам, 4 × 4 модуля. Здесь хорошо видны компактность и простота установки обеззараживания. Обратите внимание на люки доступа к балластам и лампам в верхней части модулей. При открытии люка происходит автоматическое выключение УФ. В верхней части снимка видны задвижки с противовесом: они позволяют поддерживать постоянный уровень воды над лампами, каким бы ни был расход воды в канале.

■ Системы очистки

Для обеспечения требуемой дозы УФ необходимо систематическая чистка кварцевых трубок. Это должно осуществляться с помощью систем механической чистки кварцевых трубок (фото 17) и химической чистки на месте применения; частота проведения последней будет определяться в процессе работы. В дополнение к системе механической очистки может быть использована чистка сильно сжатым воздухом, что позволяет облегчить техническое обслуживание модулей и канала (фото 18).

■ Регулирование уровня

УФ-лампы должны постоянно оставаться под водой, так чтобы сохранялась наибольшая полезная длина дуги и не было перегрева, которое влечет за собой более быстрое загрязнение кварцевых трубок. Для поддержания уровня воды в заданном интервале можно использовать три устройства: фиксированный перелив, регулируемый перелив и задвижки с противовесом.



Фото 18. Система чистки сильно сжатым воздухом на модуле Aquavay 40 (станция в Файрборне, штат Огайо, США)

6.8. Реакторы для обработки промышленных вод

Наиболее распространенной областью их применения является обеззараживание*

- чистых и сверхчистых вод в сочетании с УФ-обработкой или без нее,
- промывных вод в аграрно-пищевой промышленности;
- вод, циркулирующих в системах охлаждения,
- аквариумных вод и вод, используемых в рыбоводстве (с оборотным водоснабжением)

■ Типы реакторов

В перечисленных выше областях применяют те же самые реакторы, что и при обработке питьевой воды и сточных вод. Выбор зависит от качества подлежащей обеззараживанию воды. Если пропускная способность воды более 85 %, используют реакторы, предназначенные для обработки питьевой воды. При более низкой пропускной способности применяют реакторы, предназначенные для обработки сточных вод. Системы очистки УФ-ламп те же, а их выбор зависит от конкретных условий применения реактора

6.9. Устройства контроля и регулирования

6.9.1. Устройства контроля

Чтобы обеспечить стабильность результатов процесса обеззараживания, в системах УФ-обеззараживания устанавливаются устройства контроля. Их используют и в процессе технического обслуживания этих систем. С их помощью осуществляется

- контроль за работой ламп (включение/выключение, ток, напряжение, количество рабочих часов, количество циклов включения/выключения),
 - одно или несколько измерений интенсивности УФ-излучения внутри реактора (датчик УФ),
 - измерение расхода обрабатываемой воды;
 - в некоторых случаях — постоянное измерение пропускной способности УФ,
 - в некоторых случаях — расчет дозы УФ, выдаваемой системой, на основе измерений пропускной способности УФ, интенсивности УФ и расхода обрабатываемой воды.
- Все эти устройства устанавливаются на системах УФ-обеззараживания с модулями **AquaRay**.

6.9.2. Устройства регулирования дозы УФ

Работа устройств регулирования дозы УФ определяется по таким показателям, как расход обрабатываемой воды, интенсивность УФ (в некоторых случаях — ток лампы) и пропускная способность УФ.

Чтобы обеспечить заданную величину дозы УФ, устройство регулирования может изменять количество рабочих ламп УФ или их мощность, в некоторых случаях менять ток дугового разряда (**AquaRay H2O**) либо выключать и вновь включать лампы в определенном порядке (**AquaRay 40 HO**).

6.10. Безопасность и окружающая среда

Пространство канала для УФ-обеззараживания должно быть ограждено таким образом, чтобы исключить прямой незащищенный доступ. Следует избегать попадания УФ в глаза и на кожные покровы

7. Критерии выбора окислителей и обеззараживающих средств

Основные критерии, которые надо принять во внимание при выборе способа окисления и обеззараживания, приведены в табл. 15. Для достижения поставленной задачи и оптимизации процесса обработки может оказаться целесообразным комбинирование нескольких способов.

Как уже сказано ранее, во всех случаях применения любого способа обеззараживания эффективность обработки существенно зависит от характеристик обрабатываемой воды, наличия конкурирующих реакций и соответствия условий работы установки скоростям реакций. И если относительно просто обеспечить скорость окисления органических и минеральных соединений, то в отношении скорости инактивации микроорганизмов могут возникнуть трудности вследствие

- разброса результатов,
- трудности учета явлений латентности и ослабления,
- трудности отличить влияние дозы обеззараживающего агента от влияния времени пребывания.

Последний аспект особенно важен при обеззараживании питьевой воды.

В пп 2–4 и 6 приведены значения параметра СТ для различных реагентов в отношении одних и тех же микроорганизмов, что позволяет сравнить эффективность окисления или обеззараживания этими реагентами. Параметр СТ, несмотря на простоту оценки с его помощью эффективности обеззараживающих реагентов, все же остается **упрощением**, и в настоящее время есть согласие в том, что более репрезентативной может быть модель Ома (Oma) в виде соотношения типа $C^n \cdot T^m$.

Таблица 15

Основные критерии выбора способа окисления или обеззараживания

Эффективность	Возможность достижения требуемого уровня обработки Широта спектра действия, скорость химической реакции и инактивации Гибкость при возможных изменениях характеристик воды
Возможные негативные эффекты	Образование токсичных продуктов Образование побочных продуктов
Расходы	Инвестиции Реализация процесса и обслуживание оборудования Затраты на специальную предварительную обработку
Концепция установки	Возможность прогнозирования результатов Учет возможных изменений характеристик воды Необходимость в пилотных испытаниях
Условия эксплуатации	Транспортировка и хранение реагентов или их производство на производственной площадке Простота средств наблюдения за работой установки Гибкость системы Безопасность

Но, какое бы ни использовалось соотношение для расчета или контроля (СТ или $C^n \cdot T^m$), оценка величин С и Т должна осуществляться следующим образом:

— время контакта Т должно соответствовать величине Т10, характеризующей гидравлику реактора или каждого его отделения;

— концентрация обеззараживающего реагента С может быть оценена разными методами:

- методом «потока», основанным на измерении остаточной концентрации обеззараживающего реагента на выходе из реактора, — самым простым и безопасным способом,
- методом «среднего геометрического» (учитывается средняя концентрация, полученная при интегрировании по времени гидравлического пребывания),
- методом CSTR (от англ. *completely stirred reactor* — реактор совершенного перемешивания), который основан на достижениях в разработке кинетических моделей инактивации, включающих подсчет концентрации обеззараживающего реагента в любой точке реактора (метод и модели признаны USEPA) (интегрирование площади под кривой концентрации С, изображенной на рис. 26 п. 4).

Надежность УФИ-обеззараживания обеспечивается сертифицированием аппаратов и измерением (с помощью датчиков УФИ) интенсивности излучения, реально испущенного лампами (см. п. 6.6 настоящей главы).



Глава

18

ВВЕДЕНИЕ	1169
1. ОБЩИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЛИНИИ ОБРАБОТКИ ОСАДКОВ	1170
2. УПЛОТНЕНИЕ	1173
3. КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ОСАДКОВ	1190
4. СТАБИЛИЗАЦИЯ ЖИДКИХ ОСАДКОВ	1201
5. ЛЕНТОЧНЫЕ ФИЛЬТР-ПРЕССЫ	1220
6. ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЕ	1228
7. ФИЛЬТР-ПРЕССЫ	1242
8. ТРАНСПОРТИРОВКА И СКЛАДИРОВАНИЕ ОСАДКОВ	1259

Обработка жидких осадков

Введение

Правильно разработать технологическую линию обработки осадков можно, только предварительно ответив на три следующих вопроса

- какое качество имеют осадки, которые будут подвергнуты обработке,
- какие количества взвешенных веществ (ВВ) в осадках будут подвергнуты обработке,
- каково возможное последующее использование этих осадков

Качество осадков, зависящее от загрязнений, содержащихся в сточной воде, которая поступает на очистные сооружения, и особенно от проведенной обработки (см гл 2, п 6 1), будет оказывать большое влияние на ожидаемую эффективность различных процессов их обработки на содержание сухих веществ в обработанном осадке, на расход, тип и дозировку реагентов, выбор используемого оборудования. Например, гидрофильный характер осадков (присутствие биологических, гидроксидных осадков, органических веществ и т д) будет оказывать неблагоприятное влияние на процесс обезвоживания (содержание получаемых сухих веществ в осадке будет достаточно низким) И наоборот, гидрофобный характер илов (присутствие кристаллических, тяжелых минеральных и первичных осадков отстаивания и т д) приведет к тому, что содержание сухого вещества в обработанном осадке будет скорее всего высоким

Количество взвешенных веществ (см гл 5, пп 6 1 и 6 2) является определяющим фактором при принятии решений об инвестициях в оборудование, а также при неизбежном выборе тех или иных экономических параметров Для любой рациональной разработки очистного сооружения приоритетной задачей является следующая попытаться в значительной степени сократить массу отходов, выраба-

тываемых в процессе очистки. Это сокращение может быть учтено непосредственно в технологической линии обработки воды применением органических или минеральных реагентов, биологической обработки с очень слабой нагрузкой, использованием таких способов, как **Biolysis** (см гл 11, п 4), а также, естественно, в технологической линии обработки осадков (анаэробное сбраживание, сжигание органических веществ, применение органического кондиционирования и т д)

На выбор оборудования большое влияние будет оказывать **конечное назначение осадков** (см гл 2, п 6 3), в зависимости от него можно дать ответы на следующие вопросы

- необходимо ли стабилизировать осадки,
- нужно или нет обеззараживать осадки,
- есть ли необходимость применять тот или иной реагент,
- нужно ли добиваться минимального уровня влажности,
- должен ли конечный продукт находиться в твердом состоянии,
- есть ли необходимость в альтернативной технологической линии

Последующее использование осадков будет также влиять на выбор технологической линии обработки воды. например, если осадки предполагается сжигать, то задача будет состоять в получении более сухих осадков с повышенным содержанием органических веществ

Таким образом, любые исследования по выбору последующего использования осадков должны включать в себя

- сравнительный финансовый анализ (стоимость капитальных затрат и стоимость эксплуатации),
- необходимость длительной стабильной работы предусмотренной технологической линии

При этом, естественно, должно учитываться действующее законодательство (см. гл 2, п 6 3 3)

1. Общие технологические линии обработки осадков

На рис 1 представлены основные возможные стадии обработки осадков (непрерывной линией соединены классические или разрабатываемые решения, штриховой обозначены возможные, но реже используемые пути или способы, выходящие из употребления)

В любом случае нужно решить две основные задачи

- снижение способности осадков к ферментации (стабилизация),
- сокращение объемов осадков (удаление воды, в большей или меньшей степени связанной с ВВ)

Снижения способности к ферментации (см п 4) можно добиться с помощью:

- анаэробного сбраживания (термофильного или мезофильного),
- аэробной стабилизации (термофильной с достаточной эффективностью, компостированием),
- химической стабилизации (конечным известкованием кека, если требуется продолжительная стабилизация),
- сушки (часто достаточно получить содержание сухих веществ 65–75 %, но лучше, если это значение будет превышать 90 %),
- сжигания или совместного сжигания на последней стадии

Сократить объем можно за счет



по способу **Naratherm**, хотя зачастую приходится прибегать к специальным стадиям обработки (таким, например, как пастеризация, массивное известкование)

2. Уплотнение

Уплотнение представляет собой первый, часто совершенно необходимый этап сокращения объема осадков, извлекаемых при обработке воды. Этот этап позволяет оптимизировать последующие способы кондиционирования, стабилизации и обезвоживания осадков, уменьшая размеры сооружений и стоимость их эксплуатации.

Осадки, очень сильно разбавленные после обработки воды на очистных сооружениях (содержание воды от 99 до 99,8 %), уплотняются до влажности 90–96 %, но при этом остаются жидкими, и, следовательно, сохраняется возможность их перекачивания.

Необходимость проводить уплотнение требует дополнительных вложений и может вызвать определенные неудобства, но все это щедро компенсируется выгодами, получаемыми на последующих стадиях обработки осадков, а именно

- уменьшением размеров метантенков или реакторов аэробной стабилизации,
- упразднением уплотнителей после установок биологической стабилизации, что, в свою очередь, сокращает объем загрязнений, возвращаемых на вход в очистные сооружения,
- **возможностью выделения разбавленных осадков** из первичных отстойников, что позволяет избежать ферментации в этих сооружениях, вызывающей пенообразование и разбухание (за счет нитчатых бактерий) в процессе биологической обработки,
- снижением, как правило, объемов кондиционирования осадков перед обезвоживанием,
- повышением производительности аппаратов для обезвоживания и сокращением потребления энергии,
- заметным сокращением объемов перекачивания, транспортирующих трубопроводов, передач и возможных промежуточных площадок для хранения.

Используются два способа уплотнения

- уплотнение **гравитационным отстаиванием** — отстаивание только под действием силы тяжести; обычно этот метод называется статическим уплотнением,
- **динамическое уплотнение** — концентрирование, производимое механическим способом. Главным образом здесь речь идет
 - о флотации,
 - о процеживании/фильтрации;
 - о центрифугировании.

Поскольку качество уплотняемых осадков разное, то на одном и том же сооружении часто приходится объединять два способа в целях оптимизации степени сгущения окончательной смеси (рис. 4). В зависимости от ограничений последующей технологической линии часто требуется удалить крупные вещества, нити, волокна и т. д. При необходимости именно на этой стадии уплотнения устанавливают аппараты по тонкому и грубому процеживанию, пресс-сита и т. д.

Для некоторых промышленных, минеральных и песчаных осадков иногда требуется провести очистку от песка в сепараторах циклонного типа. Этот аппарат располагается перед входом в статический уплотнитель на уровне подаваемых разбавленных осадков, что обеспечивает оптимальные результаты сепарации.



2.1. Статический уплотнитель

2.1.1. Описание

Уплотнитель (рис 5 и фото 1) имеет круглую в плане форму. Иловая суспензия подается в центр, внутрь центрального распределительного кожуха. Частицы ВВ

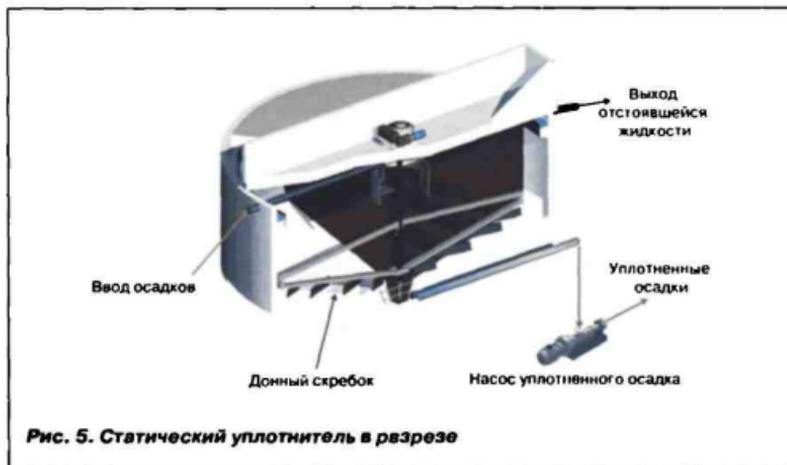




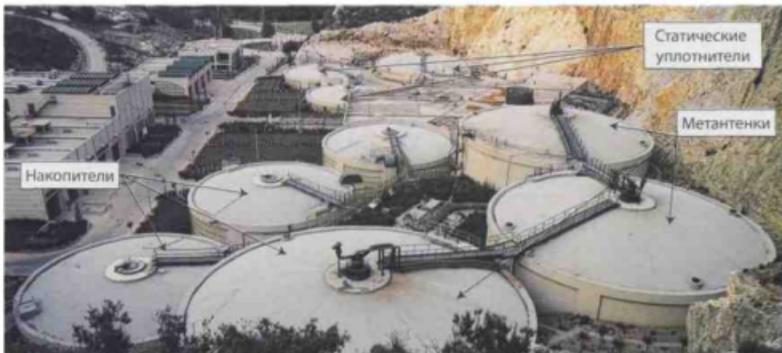
Фото 1. Статический уплотнитель диаметром 13 м

осаждаются под действием собственного веса и образуют слой концентрированных осадков в нижней части уплотнителя

Время пребывания осадков в уплотнителе обычно составляет около 24 ч. Отвод уплотненных осадков производится из приямка в центре дна. Жидкость, остающаяся сверху, отводится переливом в верхней части уплотнителя. Поворотный механический мост-скребок позволяет

- обеспечить сдвиг выпавших осадков к центральному приямку с помощью пластин скребка, расположенных в виде «жалюзи» на наклонном днище,
- облегчить выделение межчастичной воды и пузырьков газов с помощью вертикальной подвесной борны, прикрепленной к вращающемуся устройству (для некоторых осадков применение такой борны не всегда является необходимым, поскольку с этой функцией справляется арматура моста)

Органические осадки, способные к брожению (например, первичные осадки ГСВ), обрабатываются в крытых сооружениях, которые вентилируются в целях удаления запаха (фото 2)



**Фото 2. Уплотнители и метантенки в Марселе.
Производительность 1 500 000 ЭЖ**

2.1.2. Расчет

Теория Кинша позволяет рассчитать статические уплотнители, и в частности определить размер площади поверхности, соответствующей концентрации подлежащего обработке осадка (см. гл. 3, п. 3.1.3.2).

При расчете высоты цилиндрической части уплотнителя (минимум 3,5 м) нужно учитывать следующие факторы:

- желаемое время хранения осадка,
- зона осветления межчастичной жидкости (минимум 1 м);
- условия эксплуатации в зависимости от поступления и удаления осадков, т. е. от хода процесса обезвоживания.

Органические осадки, например осадки городских сточных вод, сгущаются статическим путем и, как правило, без применения полимеров. Внесение извести требуется только в том случае, если осадки, склонные к брожению, находятся в сооружении длительного времени (например, в течение выходных дней без проведения обезвоживания) или при высоких температурах. Здесь речь идет о поддержании величины рН от 7 до 8 в нижней части сооружения, что требует внесения извести в количестве около 10 % от содержания ВВ, чтобы подавить брожение, являющееся источником неприятных запахов.

И наоборот, для гидроксидных осадков (например, осадков, получаемых при производстве питьевой воды) флокуляция с полимерами представляется исключительно целесообразной, так как это позволяет значительно увеличить поток осадков на сооружение для их обработки.

В табл. 1 представлены некоторые данные по расчету статических уплотнителей для различных типов осадков.

Тип осадка		Расход полимера кг / т ВВ	Массовая нагрузка на уплотнитель кг ВВ (м ² сут)	Концентрация уплотненного осадка г ВВ / л
ГСВ	Свежий осадок первичных отстойников	-	75-120	60-100
	Свежая смесь первичного и биологического осадков	-	45-75 (в зависимости от доли первичных осадков)	40-65 (в зависимости от доли первичных осадков)
	Активный ил установок продленной аэрации	-	25-35	20-25 (в зависимости от илового индекса и наличия летучих веществ (ЛВ))
Промышленные сточные воды (ПСВ)	Осадок из установок декарбонатации (CaCO ₃ > 90 % ВВ)	0,2-0,5	800-1500	600-850
	Осадок из установок декарбонатации (CaCO ₃ = 40-60 % ВВ)	0,2-0,5	400-600	150-300
Питьевая вода	Загрязненная речная вода	0,2-0,3	60-150	35-60
	Малозагрязненная речная вода	0,3-0,5	40-60	20-35

При очистке ГСВ статический уплотнитель чаще всего применяется для обработки первичных осадков. Все реже и реже избыточные биологические илы подаются на вход в сооружение первичного отстаивания. Таким образом, уплотнение смешан-

ных осадков используется в меньшей степени (при этом следует исключить подачу на вход в статический уплотнитель по отдельности первичных осадков и биологических илов уплотнитель не является усреднительным бассейном и в иловом слое неизбежно происходит расслоение, что приводит к тому, что изменяющиеся концентрации и качество осадков чрезвычайно сильно нарушают в конечном итоге процесс их обезвоживания)

Результаты статического уплотнения биологических илов остаются достаточно низкими, поэтому для их обработки все чаще применяют динамические уплотнители

2.1.3. Реализация

Диаметр классических механизированных уплотнителей варьируется от 7 до 30 м

Наклон днища бетонных сооружений составляет около 15 %, но для обработки тяжелых гидрофобных осадков эта величина может быть больше. Используется скребок с центральным приводом и двойным диаметральной рычагом. Крутящие моменты должны соответствовать качеству осадков для плотных минеральных осадков — 60–80 м даН/м², а для осадков ГСВ — 20–30 м даН/м². Скорость движения скребка по периферии варьируется от нескольких см/с до 15–20 см/с. Высокие скорости применяются для тяжелых осадков, склонных к быстрому уплотнению (например, осадки декарбонатации)

Обычно уплотнители выполняются из бетона, но также могут быть стальными (точнее, из остеклованной, спеченной стали)

Примечание За исключением областей с жарким климатом, диаметр возводимых сооружений может составлять до 50–60 м (фото 3)



Фото 3. Установка «Valenton 1» для СИААП. Производительность 300 000 м³/сут. Уплотнитель с центральным приводом, диаметр 52 м. Осадки подвоятся насосами в центральный цилиндр

Несмотря на то что статический уплотнитель прост в эксплуатации, некоторые виды контроля осуществлять все-таки необходимо: контроль высоты слоя осадков (вручную или с помощью датчика), контроль концентрации слива (обычно от 150 до 500 мг ВВ/л), контроль концентрации уплотненных осадков. Это позволяет управлять буферной ролью сооружения в отношении последующих стадий линии обработки и притом избежать нежелательных процессов брожения. При условии проведения такого контроля установка становится автономной и не требует вмешательства операторов.

Потребление энергии остается самым незначительным от всей линии обработки осадков: от 5 до 10 кВт ч на тонну ВВ.

На очистных сооружениях ПСВ или станциях питьевой воды осадки имеют разную плотность, поэтому часто не удается избежать их расслоения. В этом случае перед уплотнителем рекомендуется устанавливать резервуар предварительной гомогенизации (с введением полимеров и возвратом концентрированных осадков), а также проводить непрерывную рециркуляцию осадков уплотнителя, хотя бы на период отсутствия обезвоживания.

2.1.4. Скоростной статический уплотнитель

В некоторых случаях не требуется добиваться высокой степени сгущения (например, при проведении процесса прямого обезвоживания с помощью центрифугирования для сокращения размеров отстойника — см гл 18, п 6.4.3). Расчет уплотнителя проводится в соответствии с первой частью кривой Кинша, в которой фаза отстаивания не замедлена.

Осадки из азротенка (2–5 г ВВ/л) подаются в этот уплотнитель, слив из которого возвращается непосредственно в азротенк, а уплотненные осадки подаются насосами на дальнейшее обезвоживание. Поскольку концентрация на входе относительно постоянна, работу такого сооружения очень легко стабилизировать.

Необходимо также провести процесс кондиционирования с помощью полимеров [1–3 кг активных веществ (АВ) на тонну ВВ]. При обработке осадков от установок с продленной азацией (нитрификация–денитрификация) и одновременным удалением фосфора (FeCl_3) их концентрация составляет от 10 до 15 г ВВ/л.

2.1.5. Сгущение промывных вод фильтров и биофильтров

Потоки промывных вод, получаемые после предварительного усреднения, являются очень разбавленными (от 0,15 до 0,8 г ВВ/л). Следовательно, необходимо обратиться к еще более быстродействующим отстойникам, а именно к установке **Densadeg**.

Гидравлические нагрузки в расчете на площадь блока пластин составляют от 15 до 25 м³/ч.

Безусловно, нужно использовать полимер с очень высокой молекулярной массой (а также обычно FeCl_3 для стимулирования процесса коагуляции).

Получаемые концентрации варьируются от 20 до 40 г ВВ/л.

2.2. Динамическое уплотнение

Динамическое уплотнение обычно применяется для обработки **легких гидрофильных осадков**, например биологических и гидроксидных осадков. Основными характеристиками такого типа уплотнения являются быстрота процесса и получение хороших результатов по концентрированию осадков, которые трудно поддаются обработке.

- Ускоренное динамическое уплотнение биологических осадков позволяет
- **отказаться от использования крупногабаритных статических уплотнителей**, которые при обработке таких типов осадков показывают довольно скромные результаты, и при этом часть загрязнений возвращается на вход в очистные сооружения (ХПК, фосфаты, азот и т. д.),
 - **значительно повысить степень уплотнения**, что приводит к сокращению размера установок на последующих стадиях процесса,
 - **уплотнять быстро**, что позволяет обрабатывать самые свежие осадки на последующих стадиях (это всегда более выгодно) и, таким образом, не возвращать загрязнения на вход в очистные сооружения (а именно это позволяет избежать самопроизвольного высаливания фосфатов, поскольку в отсутствие брожения не возникает ни анаэробно-биогаза, ни загрязнений, содержащих углерод)

2.2.1. Флотация

При уплотнении осадков обычно используют воздушную напорную флотацию, принцип действия которой изложен в гл. 3, п. 4.3

Чаще всего применяются флотационные установки, имеющие круглую в плане форму, поскольку именно они оказываются наиболее эффективными. Действительно, за счет такой конструкции слой пузырьков воздуха занимает всю поверхность сооружения. Кроме того, слой осадков становится более плотным и равномерно распределенным, и, следовательно, сфлотированные осадки получаются более концентрированными.

Насыщение воздухом можно производить прямым или косвенным образом (рис. 6). При **прямом способе** насыщения воздействию повышенного давления подвергается сам осадок. Схема повышения и снижения давления спроектирована таким образом, чтобы движущиеся компоненты осадков свободно проходили через установку, не вызывая трудностей при эксплуатации (в частности, применяются самоочищающиеся регулирующие вентили).

Данный метод имеет много преимуществ

- обеспечивается повышенное содержание сухих веществ в сфлотированных осадках (дополнительно на 5–10 г ВВ/л);
- существует возможность обработки биологических осадков без полимеров и независимо от их качества (в частности, от илового индекса и наличия летучих веществ),
- увеличивается нагрузка на сооружение по взвешенным веществам [около 100 кг ВВ/(м² · сут)],
- не требуется эксплуатационных регулировок при изменении концентрации или качества поступающего осадка,
- обеспечивается приемлемая концентрация в слое жидкости под осадком (от 80 до 200 мг/л);
- сохраняется незначительное количество донных осадков

При **косвенном способе** насыщению воздухом подвергается вода (обычно слой жидкости под осадком флотационной установки), затем вода поступает в зону разрежения и смешивания с частицами осадка на входе во флотатор. Объем воды, подввергаемый насыщению воздухом, обычно составляет не менее 80 % от объема флотиремых осадков. Надо отметить, что при сгущении биологических осадков применение косвенной системы повышения давления имеет определенные недостатки

- более низкие концентрации сфлотированных осадков;
- для обработки сложных биологических осадков (с повышенным уровнем содержания летучих веществ, высоким иловым индексом) часто приходится приме-

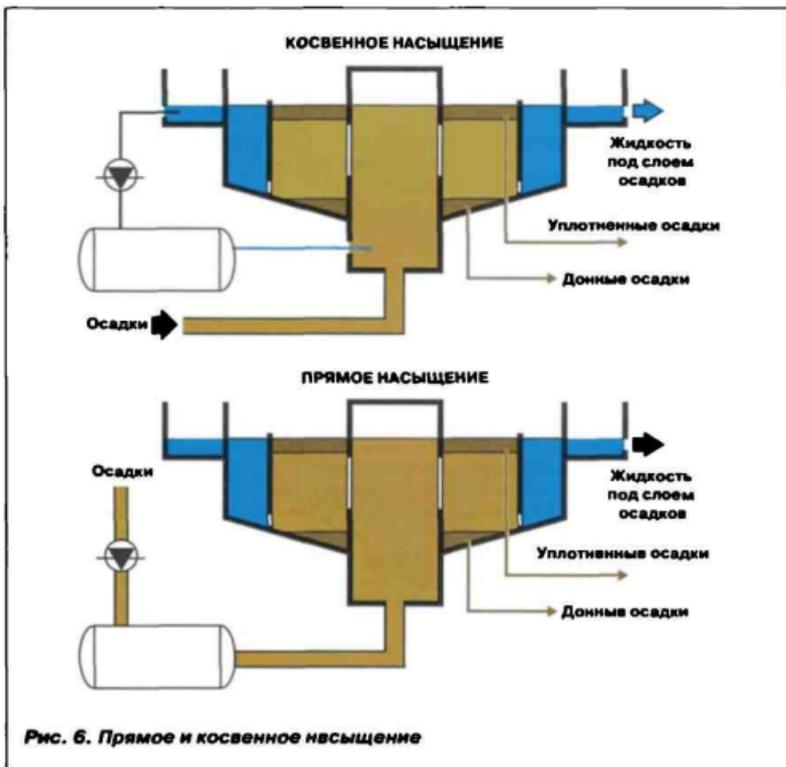


Рис. 6. Прямое и косвенное насыщение

нять полимеры с целью облегчить процесс осветления и избежать появления донных осадков.

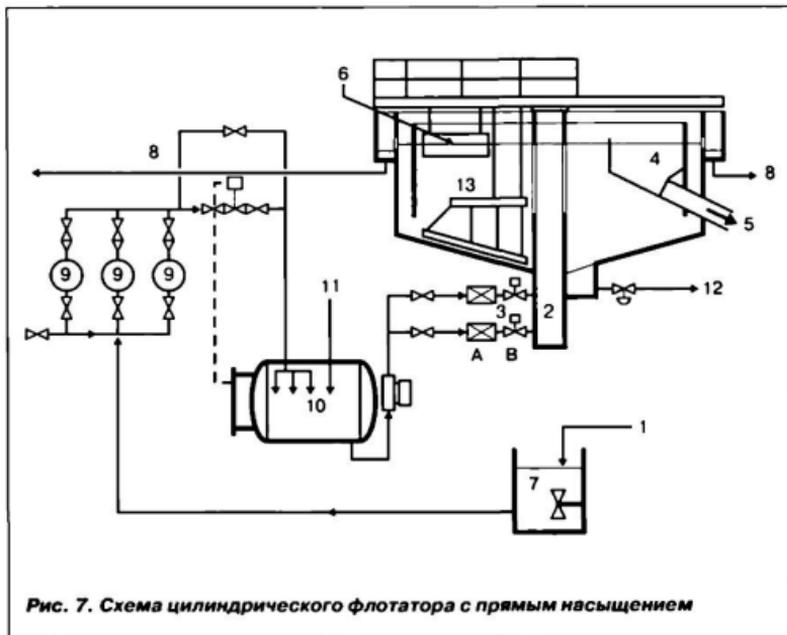
— необходимость регулировать степень рециркуляции при изменении концентрации или качества осадков. Очевидно, эту проблему можно решить следующим образом: для обеспечения безопасности нужно предусмотреть большие объемы рециркуляции (150–200 %) несмотря на то, что это приводит к повышенным энергозатратам.

Преимуществом данного способа является повышение качества жидкой фазы под осадком (50–100 мг ВВ/л)

2.2.1.1. Флотатор с системой прямого насыщения воздухом

(фото 4, рис. 7)

Подлежащие флотационной обработке осадки (1) поступают на вход в напорные насосы (9). Промежуточный бак (7) с перемешивателем и датчиком уровня позволяет адаптировать флотатор к изменяющимся расходам осадка (1). Затем подлежа-



щие обработке осадки поступают в закрытый резервуар насыщения (10), куда подается сжатый воздух (11). В этом резервуаре поддерживается постоянный уровень осадка. Далее, насыщенные воздухом осадки (давление до 4–5 бар) подвергаются разрежению в системе двойного снижения давления (3). Первый вентиль разрежения (А) обеспечивает первый сброс давления, а второй мембранный самоочищающийся вентиль (В) — окончательный сброс давления и образование соответствующих мелких пузырьков (50–100 мкм). Два контура сброса давления (каждый контур регулировать расход поступающих на флотационную установку осадков в зависимости от изменений уровня в принимающем баке (7)). После этого осадки поступают в камеру разрежения (2).

Хлопья, которые с помощью микропузырьков становятся более легкими, концентрируются на поверхности.

Скребок система (6) позволяет направить осадки в отводной желоб (4), которые затем поступают через трубопровод (5) в дегазационную камеру (при этом используется большое количество скребковых пластин, которые двигаются очень медленно во избежание появления на поверхности энергичных возмущений, затрудняющих проведение процесса).

Осветленная вода, прошедшая под затопленной перегородкой, отводится в точке (8). Донные осадки счищаются с помощью небольшого скребка (13) и периодически удаляются из установки (12). Эти потоки возвращаются на вход в очистные сооружения.



Фото 4. Флотационные установки-уплотнители (очистные сооружения «Achères V»)

2.2.1.2. Результаты обработки биологических осадков с применением системы прямого насыщения

На основе анализа результатов работы более 200 очистных сооружений были получены расчетные параметры

- для уплотнения без полимеров,
- для систематической работы самоочищающегося мембранного клапана (с последовательным открытием),
- для осадков от продленной аэрации (без первичного отстаивания)
 - нагрузка от 4 до 6 кг ВВ/(м² ч),
 - при иловом индексе $I_b < 150$ сфлотированный осадок содержит 4–5 % сухих веществ (СВ),
 - при $I_b = 150–250$ сфлотированный осадок содержит 4,0–4,5 % СВ,
 - при $I_b > 250$ сфлотированный осадок содержит 3,5–4 % СВ.
- для биологических осадков (с применением первичного отстаивания)
 - нагрузка от 3,5 до 4,5 кг ВВ/(м² ч),
 - при $I_b < 100$ сфлотированный осадок содержит 4,0–4,5 % СВ,
 - при $I_b = 100–250$ сфлотированный осадок содержит 3,5–4,0 % СВ,
 - при $I_b = 200–300$ сфлотированный осадок содержит 3,0–3,5 % СВ;
 - при $I_b > 300$ сфлотированный осадок содержит менее 3,5 % СВ

В этом случае максимальная скорость восходящего потока не превышает 2 м/ч. Для обеспечения достаточного уровня насыщения рекомендуется применять концентрацию поступающего осадка менее 6 г ВВ/л (отбор осадков по выбору либо из биологического резервуара, либо из рециркулирующего потока отстойника)

2.2.1.3. Характеристики обработки гидроксидных осадков (например, осадков от производства питьевой воды)

В данном случае необходимо использовать полимеры. Следовательно, для этого типа обработки должен применяться способ **косвенного насыщения**. Концентрации сфлоторованных осадков будут составлять 25–30 г ВВ/л, и скорость порядка 3–4 м/ч для разбавленных осадков (1–2 г ВВ/л)

2.2.1.4. Характеристики сгущения промывных вод фильтров и биофильтров

Эти очень разбавленные осадки тоже могут быть сгущены с помощью флотации. Речь идет о флотации достаточно сильно загрязненной воды. В связи с этим необходим реагент — полимер дозой 2–4 кг активного вещества на тонну ВВ. В случае сильноразбавленных осадков (150–400 мг ВВ/л) часто возникает необходимость провести процесс коагуляции с применением $FeCl_3$. Введение полимера проводится прямо в трубопровод. **Косвенное насыщение** (рециркуляция 20–30 %) в этом случае оказывается более эффективным, поскольку обычно требуется обеспечить получение хорошо осветленной воды под флотопродуктом (от 15 до 80 мг ВВ/л).

Гидравлические нагрузки могут составлять 3–10 м/ч (в зависимости от типа промывной воды), а искомые концентрации должны находиться в диапазоне 25–40 г ВВ/л.

2.2.1.5. Применение прямых флотаторов

Для крупных очистных сооружений более конкурентными являются флотаторы больших размеров из бетона и стали. На сегодняшний день диаметр используемых флотационных установок составляет не более 20 м, поскольку это позволяет обрабатывать биологические осадки от очистных сооружений производительностью порядка 500 000 ЭЖ.

Флотатор работает в непрерывном режиме и не нуждается в постоянном наблюдении (один раз в день нужно проверять высоту слоя осадка). Извлечение осадков (скребками) может быть автоматизировано (с помощью датчика высоты слоя поверхностных осадков, толщина слоя 30–60 см).

Расход воздуха составляет от 1 до 2 % от взвешенных веществ.

Потребление энергии остается достаточно высоким (по сравнению со статическими уплотнителями и аппаратами сжеживания) — от 60 до 120 кВт · ч на тонну ВВ, но это компенсируется большой гибкостью и надежностью работы установки, и в большинстве случаев процесс удается провести без полимеров.

Как правило, этот тип установок не требует применения резервного оборудования (кроме насосов). Действительно, всегда остается возможность мгновенно увеличить нагрузку на флотатор (например, при пиковых потоках, нарушениях работы, задержке абсорбции и т. д.) В этом случае приходится использовать полимер для обеспечения режима «флотации под большой нагрузкой» (введение полимера прямо в трубопровод).

Характеристики обработки биологических осадков продленной аэрации оказываются следующими:

- доза полимера 2 кг/т ВВ, нагрузка от 6 до 8 кг ВВ/(м² · ч),
- доза полимера 3 кг/т ВВ, нагрузка от 7 до 9 кг ВВ/(м² · ч),
- доза полимера 5 кг/т ВВ, нагрузка от 20 до 40 кг ВВ/(м² · ч).

Концентрации увеличиваются незначительно, но зато слой воды под осадком становится менее загрязненным — 30–50 мг ВВ/л.

За счет введения кислорода и короткого времени обработки осадков работа флотатора не создает проблем в части выбросов, особенно если установка работает в

непрерывном режиме. Однако осадки во флотаторах представлены в открытом виде, и поэтому многие сооружения сегодня укрываются и вентилируются.

2.2.2. Процеживание

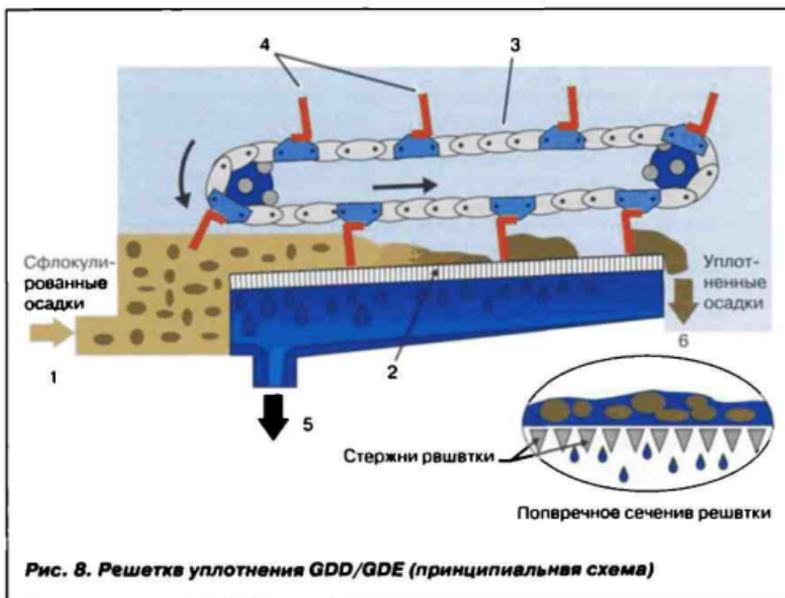
На небольших и средних очистных сооружениях часто уплотнение выполняется с помощью процеживания. Соответствующие аппараты компактны и просты в эксплуатации, но требуют формирования объемных дифференцированных флокул, что влечет за собой повышенное потребление полимеров.

Получаемые таким путем концентрации осадков оказываются выше, чем в результате обработки во флотаторе, при меньшем потреблении электроэнергии (25–50 кВт·ч на тонну ВВ).

2.2.2.1. Решетки GDD/GDE (рис 8 и 9)

■ Описание

Эти высокопроизводительные аппараты позволяют обрабатывать **разбавленные биологические осадки**. Предварительно сфлокулированные осадки (1) (для небольших установок применяется статический циклонный флокулятор, а для крупных сооружений — механический флокулятор) подаются на горизонтальную поверхность тонкой решетки (2). Особая форма стержней решетки, а также соответствующий размер межстержневых расстояний (от 350 до 800 мкм) позволяют обеспечить быстрый дренаж свободной межчастичной воды. Хлопья остаются на



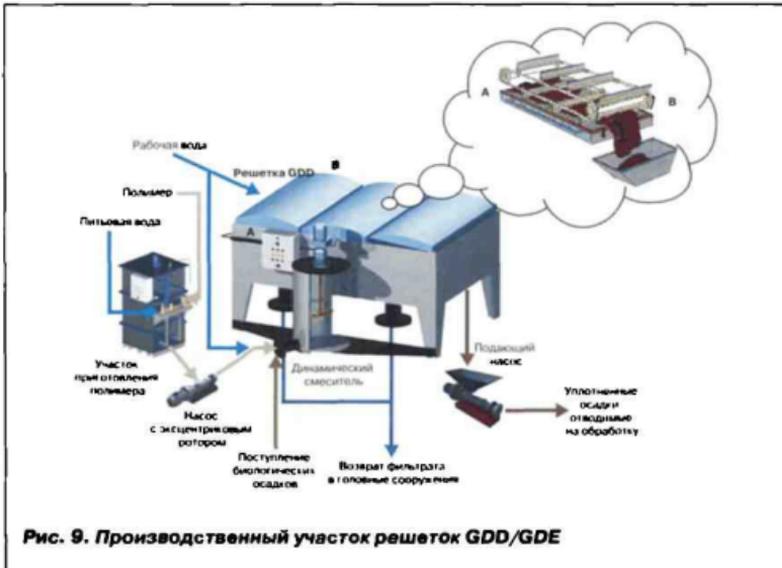


Рис. 9. Производственный участок решеток GDD/GDE

решетке, где они постепенно уплотняются и поступают к выходу (6) посредством резиновых скребковых пластин (4), приводимых в движение цепным приводом (3). Фильтрат (5) собирается в камеру, расположенную под решеткой.

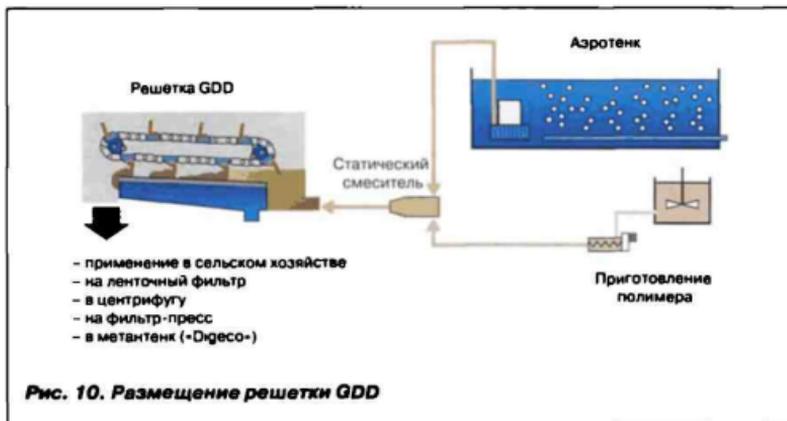
Весь комплекс решетки защищен ограждением. Периодически решетка промывается с помощью распределительной рампой с форсунками, передвигающейся под решеткой. Таким образом, вся площадь комплекса решетки промывается без прерыва работы аппарата.

■ Преимущества

Преимущества решеток GDD/GDE заключаются в следующем:

- работа установки проходит в непрерывном режиме и не требует постоянного контроля;
- аппараты очень компактны, полностью закрыты (полностью закрытый корпус с системой вентиляции на дезодорацию), что позволяет не допустить появления вредных выделений; все детали аппаратов выполнены из нержавеющей стали и пластмассы для предотвращения коррозии;
- **фильтрующее средство** (решетка) **неподвижно**: отсутствуют подвижные сетки, следовательно, нет никаких ограничений для направления и боковых перемещений;
- решетка GDD (рис 10) (прозоры двух размеров. 350 и 600 мкм) может обрабатывать сильноразбавленные осадки (до 2 г ВВ/л).

Это последнее преимущество является ключевым, поскольку позволяет проводить отбор жидкости непосредственно из биологического резервуара вне зависимости от концентрации в нем осадков. Таким образом, наблюдается устойчивое постоянство концентрации на входе аппарата, что позволяет оптимально подобрать



полимер и обеспечить надежность работы без постоянного наблюдения (естественно, это не касается ситуации, когда забор проводится из рециркуляционных колодцев отстойника, концентрация в котором варьируется в зависимости от изменяющихся потоков на входе, а также от управления взвесью осадка).

Решетка GDD позволяет быстро уплотнить хорошо аэрированные осадки и, следовательно, практически не генерирует загрязнений (фосфаты, БПК₅ и т. д.), вращающихся на вход в очистные сооружения. При обработке сильноразбавленных осадков используемый полимер должен представлять собой ретикулярную змульсию, чтобы создать достаточно объемные и устойчивые флокулы.

Решетка GDE (размер прозоров 600 или 800 мкм) предназначена для обработки более концентрированных осадков.

■ Расчет

Для обработки биологических осадков городских сточных вод необходимо придерживаться параметров, представленных в табл. 2.

Таблица 2

Рекомендуемые параметры обработки биологических осадков ГСВ на решетках GDD/GDE

Концентрация осадков на входе, г ВВ/л	Решетка	Гидравлическая нагрузка, м ³ /м ² ч	Массовая нагрузка, кг ВВ/(м ² ч)	Содержание СВ на выходе, %	Эффект задержания, %	Потребление полимера (по активному веществу), кг/т ВВ
2	GDD	28-35	55-70	4-6	90-93	4-5 (змульсия)
4	GDD	28-35	110-140	4-8	91-94	
8	GDD	25-30	200-240	4,5-6,5	93-97	
10	GDE 6 (600 мкм)	22-28	220-280	5,0-6,5	93-97	3-4 (змульсия или порошок)
15		17-22	250-330	6-8	97-98	
20	GDE 8 (800 мкм)	15-20	300-400	8-10	> 98	3-4 (змульсия или порошок)

Эффективность сепарации высокая, поскольку отсутствует прессование, а промывка проводится регулярно.

Решетки GDD/GDE используются до установки по обезвоживанию осадков (рис. 11). Не всегда является целесообразным добиваться максимальной степени уплотнения, поскольку это может помешать флокуляции на начальных стадиях процесса обезвоживания, т. е. в центрифугах и даже в фильтр-прессах

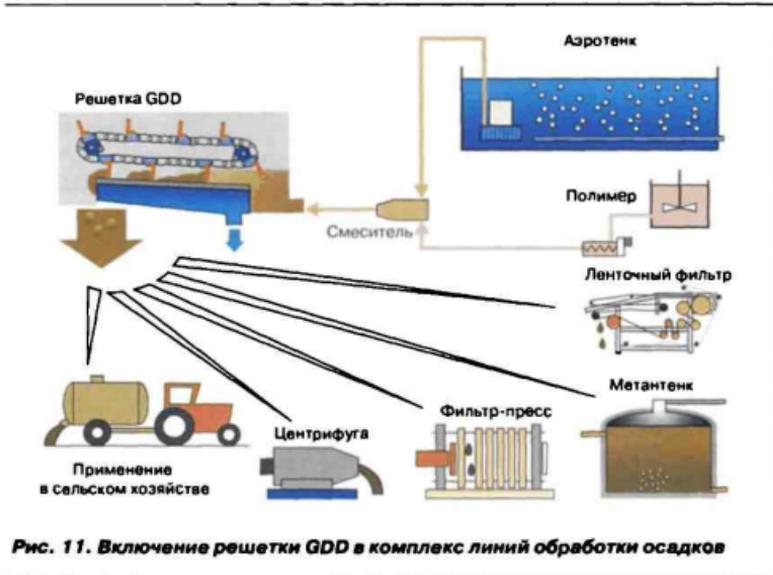


Рис. 11. Включение решетки GDD в комплекс линий обработки осадков

■ Реализация (фото 5)

Ширина решеток варьируется от 0,5 до 4 м (или по производительности от 10 до 140 м³ осадков в час).

Решетки могут быть размещены либо на уровне земли с установкой питающего насоса, либо прямо на резервуаре-накопителе уплотненных осадков

Потребление промывной воды незначительно, так как распределительные ramпы расходуют воду очень умеренно и в дискретном режиме.

Капитальные затраты на динамическое сгущение с помощью решеток GDD/GDE выдерживают самую жесткую конкуренцию.

2.2.2.2. Стол для процеживания осадков (рис. 12)

Процеживание проводится на подвижном полотне (600–800 мкм), напоминающем ленточный фильтр (см. п. 5)



Фото 5. Решетка GDD



Рис. 12. Принципиальная схема столва для процеживания осадков

Для проведения процесса необходимо использовать устройства натяжения и направления ленты. Промывка проходит в непрерывном режиме [при довольно большом расходе воды $4-5 \text{ м}^3/(\text{м} \cdot \text{ч})$].

Скорость прохождения ленты также достаточно высокая — от 10 до 20 м/мин.

Вследствие этого гидравлическая производительность относительно высока и составляет от 40 до 60 м^3 на 1 м ширины в час. Окончательное уплотнение можно провести после выхода из аппарата.

Однако данный тип установок является менее компактным (они достаточно длинные) и требует определенного наблюдения за работой, а именно контроля прохождения ленты. Кроме того, обрабатываемые осадки должны обычно содержать не более 4–5 г ВВ/л. Такие аппараты также могут быть полностью закрыты кожухом, что затрудняет техническое обслуживание установки.

2.2.2.3. Барабан для процеживания осадков

Вращающиеся барабаны для процеживания осадков оснащаются фильтрующим цилиндром (обычно тканевым). Их производительность относительно невысокая (следовательно, их можно рекомендовать для небольших сооружений), и они требуют формирования прочных флокул, так как, в отличие от решеток и стола для процеживания осадков, на флокулированный осадок оказывает негативное влияние вращение аппарата. Таким образом, эти барабаны предназначены для обработки более густых осадков (7–10 г ВВ/л).

2.2.3. Центрифугирование

Технология процесса центрифугирования описана в п. 6.

Этот метод позволяет добиться самой высокой степени уплотнения за счет простой настройки операционных параметров.

Обычно в данном процессе используются те же деканторы (центрифуги), что и при обезжелезивании. Следует отметить, что некоторые изготовители предлагают более специфические конструкции машин (например, центрифугу с тонкослойной зоной отбора фугата).

Технология центрифугирования полностью оправдана для обработки очень концентрированных осадков перед их подачей на стабилизацию.

Чтобы фугат не был сильно загрязнен, необходимо вносить определенную (небольшую) дозу полимера (это является жестким требованием при работе на аппаратах с разбавленными осадками). Таким образом, нужно добиваться получения фугата, содержащего менее 500 мг ВВ/л.

При проведении процесса уплотнения размеры установок ограничиваются гидравлическим расходом. Поэтому необходимо откачивать осадки из рециркуляционных колодцев осветлителя таким образом, чтобы концентрация на входе в машину достигала хотя бы 7–8 г ВВ/л. Поскольку концентрация осадков непостоянна, данный способ оказывается очень чувствительным к изменениям характеристик осадков. Чтобы сделать процесс более надежным, нужно предварительно установить бак усреднения или соответствующее автоматическое оборудование (например, стабильность концентрации на выходе из аппарата можно обеспечить с помощью контроля дифференциальной скорости шнека по данным измерения концентрации уплотненных осадков).

Так как машины центрифугирования работают с большим гидравлическим расходом и с относительно небольшой массовой нагрузкой, потребление энергии в данном случае будет наиболее высоким по сравнению с другими аппаратами для уплотнения осадков: от 120 до 200 кВт·ч на тонну ВВ.

В качестве примера в табл. 3 приведены данные по обработке биологических осадков ГСВ с $l_0 < 150$ и с содержанием летучих веществ менее 75 % на аппарате с диаметром ротора $d = 500\text{--}550$ мм и при соотношении $L_T/d > 4$ (L_T — общая длина ротора).

Уплотнение центрифугированием обычно используется на относительно больших очистных сооружениях и в тех случаях, когда производственные площади огра-

Таблица 3
Данные по обработке биологических осадков ГСВ аппаратом с диаметром ротора 500–550 мм и при $L_p/d > 4$

Концентрация на входе г ВВ/л	Расход м ³ /ч					
	50–60			40–50		
	Содержание СВ %	Полимер кг/т ВВ	Эффект задержания %	Содержание СВ %	Полимер кг/т ВВ	Эффект задержания %
6–9	4–5–6	2–3	> 95	4–5–6	1,0–1,5	> 95
4–5	4–5–6	2,5–3,5	> 92	4–5–6	1,5–2,0	> 92
3–4	4–5–6	3–4	> 89	4–5–6	2,0–2,5	> 89

¹ Можно добиться еще более высокого содержания сухих веществ (до 7–8 %) но часто в этом нет необходимости из-за ограничений, присущих последующим этапам обработки осадков. Кроме того, увеличение содержания сухих веществ может вызвать избыточное потребление полимера и снижение эффекта задержания.

ничены, так как установка отличается особой компактностью и отсутствием неприятных запахов.

Работа установок центрифугирования подробно описана в п. 6. Тем не менее необходимо указать основные операционные параметры функционирования этих машин при проведении уплотнения.

- относительно высокая скорость вращения шнека V_R (от 15 до 30 об/мин),
- незначительная величина крутящего момента позволяет не устанавливать другие автоматические устройства для стабилизации машины, устройства, изменяющие расход осадка для определения параметров вводимого полимера; автоматическую систему регулирования скорости вращения V_R или глубины жидкого кольца посредством измерения концентрации уплотненных осадков, приборы контроля за осветлением фугата и т. д.,
- отпадает необходимость систематически решать задачу по получению наиболее высоких скоростей вращения ротора,
- настройка глубины жидкого кольца точная, обычно с небольшим отрицательным значением.

При обезвоживании осадков центрифугированием применение идентичных уплотнительных аппаратов может иметь эксплуатационный интерес¹ в качестве вспомогательного средства, из-за однотипности запасных частей и т. д.

3. Кондиционирование осадков

Несмотря на то что некоторые осадки «флокулируются естественным образом» (например, активные илы) или же образовались в результате процесса флокуляции (например, гидроксидные осадки), их устойчивость к фильтрации и коэффициент сжимаемости все-таки остаются слишком высокими, чтобы обеспечить корректное разделение воды и твердых частиц и дать возможность использовать различное обезвоживающее оборудование. Таким образом, необходимо предварительно «разбить коллоидное сцепление осадков» и искусственным образом увеличить размер образующих эти осадки частиц

Именно в процессе кондиционирования приходится обращаться к химическим (добавление минеральных реагентов и синтетических полимеров), а иногда и к физическим (термическая обработка) методам.

Таким образом, процесс обезвоживания осадка в значительной степени зависит от адекватного кондиционирования. Этот этап позволяет решить поставленные задачи по окончательным значениям содержания сухого вещества, производительности и эксплуатационным затратам.

В соответствии с типом используемого кондиционирования можно удалить свободную воду осадка и даже часть связанной воды. По измерению активности воды a_w в осадке можно судить о ее наличии, а также о ее способности быть извлеченной из структуры взвешенных веществ (а w находится в диапазоне 0–1, при $a_w = 1$ вода на 100 % свободна и готова к удалению).

На рис. 13 показано влияние кондиционирования на долю свободной воды, которая легко поддается удалению. Термогравиметрический анализ, используемый для

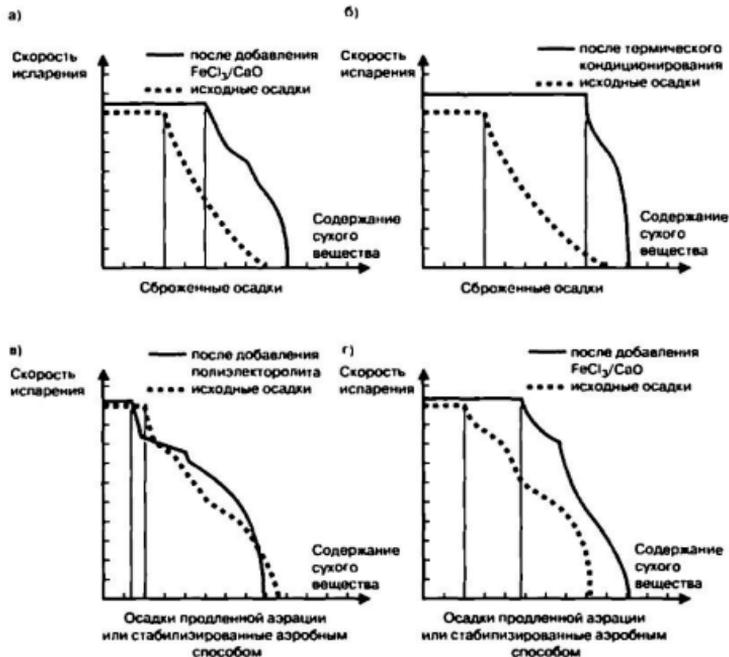


Рис. 13. Влияние кондиционирования осадков на скорость испарения воды (термогравиметрический анализ)

измерения влияния типа кондиционирования, достаточно прост в применении осадки помещаются в прогретую камеру, в которой поддерживается постоянная влажность, и производится замер скорости испарения воды в течение определенного времени. Полученные кривые позволяют отличить легкоудаляемую воду (свободная вода имеет постоянную скорость испарения) от воды, которая связана химически или физически.

Среди различных применяемых методов самым эффективным является термическое кондиционирование (см. рис. 13, б), позволяющее снизить гидрофильность частиц (увеличение активности воды при одинаковом исходном содержании). Химическая флокуляция, проведенная с использованием минеральных электролитов (солей металлов и особенно извести), хотя и в меньшей степени, но все-таки снижает уровень связанной воды (см. рис. 13, а, г). Применение полиэлектролитов вызывает лишь незначительное понижение уровня связанной воды (см. рис. 13, в), а в некоторых случаях даже увеличивает этот уровень. Таким образом, тип кондиционирования будет оказывать влияние на содержание сухого вещества в полученном осадке.

3.1. Химическое кондиционирование

Каждый используемый химический реагент имеет свою эффективность по размерам формируемых хлопьев: минеральные реагенты вызывают образование зародышей, а полиэлектролиты способствуют формированию из них более объемных хлопьев.

3.1.1. Минеральные реагенты

Минеральные реагенты больше всего подходят для обезвоживания на фильтр-прессах (см. гл. 18, п. 7). Они способствуют формированию более мелких флокул, которые, однако, более устойчивы к механическому воздействию.

Можно применять самые разнообразные минеральные электролиты с поливалентным катионом, но из соображений экономии и эффективности чаще всего применяются соли железа или алюминия: такие как хлорное железо, реже — хлористый сульфат окиси железа (III) и сульфат железа (III), наконец, еще реже — сульфат железа (II) и соли алюминия.

Для обработки органических осадков (биологическая обработка городских и промышленных сточных вод) ион Fe^{3+} является наиболее эффективным и чаще всего используемым. Выбор между $FeCl_3$ и $FeSO_4Cl$ делается исходя из экономических соображений.

Введение извести, которое производится после ввода электролита ($pH > 10$, что еще соответствует уровню pH корректной флокуляции), также способствует повышению фильтруемости и вызывает:

- снижение уровня связанной воды (получение более сухого и плотного осадка);
- осаждение определенных солей кальция (органических и минеральных), которые также повышают способность к фильтрации,
- введение плотного минерального наполнителя (повышение проницаемости осадка).

Для обработки органических осадков обязательным является внесение двойной дозы соли железа / извести. Для гидрофильных гидроксидных осадков обычно достаточно введения только извести, это улучшает фильтруемость осадка.

Дозировка вводимых минеральных реагентов зависит от природы осадков, которые требуется отфильтровать, а также от требуемых результатов. Оценка дози-

Таблица 4

Дозы реагентов, обычно используемые при работе с фильтр-прессом, %

Тип осадка		$FeCl_3^1$	$Ca(OH)_2^1$
ГСВ	Первичные осадки	2–3	10–15
	Смешанные осадки	4–6	18–25
	Осадки от установок продленной азрации	6–8	30–35
Биологические осадки аграрнопищевой промышленности		7–10	35–40
Осадки осветления (гидроксиды алюминия)		–	30–50
Осадки осветления (гидроксиды железа)		–	25–40
Осадки декарбонатации		–	–
Осадки гальванических производств		–	15–25
ПСВ. Смесь физико-химических и биологических осадков		0–5 (в зависимости от пропорции)	15–30

¹ Процентное соотношение представлено по отношению к количеству ВВ осадка, подлежащего обезвоживанию

ровок вводимых реагентов в первом приближении, т. е. до фильтр-прессования, представлена в табл. 4

Чтобы обеспечить правильную эксплуатацию фильтров, следует соблюдать минимальную дозу реагентов, необходимую для достаточной фильтруемости (для камерного фильтр-пресса она выражается с помощью удельного сопротивления осадка $r_{0,5}$, которое составляет от $5 \cdot 10^{11}$ до $15 \cdot 10^{11}$ м/кг). Передозировки реагентов вызывают лишь крайне незначительное улучшение результатов, поэтому они бесполезны.

В каждом конкретном случае необходимые дозы рекомендуется определять с помощью простых лабораторных тестов [см. гл. 5, пп. 6.6 и 6.8 по измерению $r_{0,5}$ и времени капиллярного всасывания (CST — от англ. *capillary suction time*)].

Наличие в осадке волокон или плотных минеральных веществ вызывает необходимость уменьшения доз реагентов. Значительное содержание органических белковых веществ ведет к противоположной тенденции (к увеличению доз). Введение реагентов увеличивает количество веществ, которые нужно отфильтровать, потому что большая доза введенных химических реагентов остается в обезвоженном осадке в твердом виде в результате выделения гидроксидов металлов и солей кальция. Это нужно учитывать при расчете аппаратов для фильтрации осадков.

- от 60 до 70 % массы введенного $FeCl_3$ переходит в осадки,
- от 80 до 90 % массы введенного $Ca(OH)_2$ переходит в твердую форму.

В соответствующей пропорции в раствор перейдет определенная часть реагентов в форме Cl^- или Ca^{2+} , которые будут находиться в фильтрате.

■ Применение минеральных реагентов

Необходимо добиться максимального смешивания реагентов с осадком. Введение воды для разбавления (для концентрированного раствора $FeCl_3$) и использование известкового молока с концентрацией от 50 до 80 г/л облегчают распределение реагентов по всей массе.

Флокуляция осадков проводится последовательно в серии баков с перемешиванием (первый бак предназначен для соли металла, а второй — для извести, см. п. 7). Время пребывания смеси в баках составляет от 5 до 10 мин; этого достаточно для укрупнения хлопьев. Требуемая энергия перемешивания достаточно высока (150–300 Вт/м³), но не чрезмерна.

Увеличение времени на созревание хлопьев может быть полезным, однако продолжительное и сильное перемешивание может снизить фильтруемость кондиционированного осадка. Длительное хранение кондиционированного осадка до фильтрования (что иногда бывает полезно для работы фильтров) также может снизить фильтруемость, особенно тех свежих городских осадков, которые были недостаточно обработаны известью, и следовательно, в них будут протекать дальнейшие реакции.

Перемещение сфлукированного осадка не должно провоцировать разрушение хлопьев. Поэтому необходимо избегать центробежных насосов и использовать насосы с эксцентриковым ротором. Для некоторых типов абразивных осадков целесообразно применять поршневые/мембранные насосы высокого давления.

Цех по кондиционированию осадков может быть полностью автоматизирован с управлением подачей реагентов в зависимости от расхода и, возможно, концентрации осадков.

3.1.2. Синтетические полиэлектролиты

3.1.2.1. Выбор и дозировки полиэлектролитов

Эффективными являются только полиэлектролиты с длинной молекулярной цепочкой (с высокими молекулярными массами на основе полиакриламида), так как они формируют объемные флокулы (размером несколько миллиметров), обладающие прочностью к сдвигающим усилиям и потому хорошо выделяющиеся в осветленной межчастичной воде.

Такие полиэлектролиты вызывают следующие эффекты.

— стимуляция сильно выраженной флокуляции благодаря образованию мостов между частицами и благодаря их длинным молекулярным цепочкам, для катионных полимеров такая флокуляция будет усиливаться за счет «коагулирующего» эффекта;

— сильное снижение удельного сопротивления осадка, поскольку освобожденная межчастичная вода очень легко дренируется, с другой стороны, эти хлопья, зачастую рыхлые и гидрофильные, вызывают увеличение коэффициента сжимаемости осадка.

Структура хлопьев, полученных таким образом, позволяет:

— разрабатывать установки дренажа для быстрого и эффективного сгущения осадков: решетки **GDD**, **GDE**, фильтрующие барабаны, стол для процеживания осадков (см. п. 2),

— разрабатывать фильтры, оснащенные фильтрующим носителем с широким интервалом размеров отверстий (от 0,4 до 1 мм), которые меньше подвержены забиванию: ленточные фильтр-прессы типа **Supapress** и **GDPRESS**, специально спроектированные для обезвоживания осадков (см. п. 5);

— существенно увеличить эффективность центрифуг (производительность и особенно содержание сухого вещества) за счет явного увеличения плотности соединенных частиц (см. п. 6).

Существует большое количество доступных для применения полиэлектролитов. Для того чтобы выбрать наиболее подходящий реагент, необходимо провести простые тесты на флокуляцию, дренаж и прессование (см. гл. 5, п. 6.9). Такие тесты позволяют:

— получить наиболее четко выделяющиеся хлопья;

- определить механическую устойчивость хлопьев (это важно для центрифугирования),
- определить, обладает ли сфлуктурированный осадок достаточной способностью к дренажу (это важно для ленточных фильтров и дренажных аппаратов),
- определить сжимаемость осадков, прошедших дренаж,
- оценить наличие или отсутствие способности к текучести,
- оценить адгезию прессованных хлопьев к фильтрующему полотну.

Затем по полученным результатам выбрать один или несколько полимеров и их наиболее экономичную дозировку.

Окончательное решение принимается по результатам промышленных испытаний с предварительно отобранными реагентами.

Катионные полиэлектролиты наиболее эффективны для кондиционирования осадков с повышенным содержанием органических веществ (ОВ) (соотношение ОВ/ВВ больше 40 %) или с повышенным содержанием целлюлозных волокон. Для некоторых случаев применения (например, обезвоживание на фильтр-прессе) полиэлектролит может быть ассоциирован с солью металла следующим образом: сначала проводится предварительная коагуляция с солью железа, а затем с помощью полиэлектролита формируются менее гидрофильные хлопья.

Полиэлектролиты со средней молекулярной массой больше подходят для ленточных прессующих фильтров, способствуя дренажу. Для центрифугирования больше подходят полиэлектролиты с очень высокими молекулярными массами, вызывающие образование плотных хлопьев, которые обладают большим сопротивлением сдвигу (табл. 5).

Таблица 5
Средний расход полиэлектролитов при обезвоживании осадков с помощью ленточного фильтра и центрифугирования

Типы осадков		Катионный полиэлектролит, кг АВ/т ВВ	
		Ленточный фильтр	Центрифуга высокого давления
ГСВ	первичные	2-3	4-5
	свежие смешанные	3-5	6-9
	смешанные сброженные	4-5	6-9
	осадки от продленной аэрации	4-6	7-11
Биологические осадки сточных вод аграрнопищевой промышленности		5-7	8-12
Осадки сточных вод целлюлозно-бумажного производства		2-4	3-4

Анионные полиэлектролиты находят широкое применение при обработке осадков с большим содержанием минеральных компонентов (плотные гидрофобные осадки, а также осадки гидроксидов металлов). Такие полимеры вводят обычно в умеренных дозах — приблизительно от 0,3 до 3 кг/т ВВ.

Для смеси органических (например, биологических) и минеральных (например, гидроксидов) осадков ионность полиэлектролитов может изменяться в зависимости от их соотношения в обрабатываемой массе.

3.1.2.2. Применение полиэлектролитов

Для обработки осадков полиэлектролиты поставляются либо в виде порошка, либо, что случается все чаще, в виде стабилизированной эмульсии. В гл. 20, п. 6, даны общие рекомендации и схемы систем подготовки полиэлектролитов.

Порошковые полиэлектролиты обычно готовятся в виде растворов с концентрацией от 2 до 4 г/л максимум. Перед использованием этот раствор необходимо оставлять для «созревания» приблизительно в течение одного часа. Растворы порошковых полиэлектролитов сохраняют в полной мере свою эффективность только в течение 2–3 дней.

Полиэлектролиты в виде эмульсии также должны готовиться в два этапа:

- сначала проводится инверсия эмульсии: концентрированный раствор разбавляется питьевой водой при сильном перемешивании дозой от 6 до 10 мл эмульсии на 1 л воды,

- затем раствор должен созревать в течение 20 мин при медленном помешивании.

При использовании полимера в виде эмульсии необходимо различать количество коммерческого реагента и количество действительно активного реактива. Обычно концентрация АВ эмульсии составляет от 40 до 50 % при плотности, близкой к плотности воды.

Чтобы была возможность сравнить расходы полимеров в виде эмульсии и порошковых, дозы должны быть представлены в килограммах АВ или в евро на тонну сухого вещества.

Иногда маточный раствор активных веществ (от 2 до 5 г АВ/л) разбавляется перед введением его в осадок, но установленного правила на этот счет нет, так как все зависит от вязкости осадка и раствора полиэлектролита. Смешивание осадка с полиэлектролитом проводится очень легко, при этом флокуляция происходит почти мгновенно, но формируемые хлопья часто оказываются неустойчивыми при применении:

- центрифуги, введение полиэлектролита происходит прямо в трубу подачи осадка на входе в аппарат и без использования камеры флокуляции, так как для инициирования процесса достаточно энергии, производимой центрифугой (см. п. 6);

- ленточных фильтр-прессов, подача полиэлектролита производится в небольшой бак с перемешиванием, расположенный до дренажной зоны аппарата, при этом время флокуляции очень непродолжительно и обычно составляет меньше 1 мин;

- решеток GDE и GDD и упрощенных ленточных фильтров; флокуляция также проводится путем введения полиэлектролита в трубу через статический циклонный смеситель (см. гл. 10, п. 1.2.1.4);

- фильтр-пресса. Правила ввода полимеров более сложные, так как производительность фильтр-пресса меняется в ходе цикла, то можно применять различные методики осуществлять ввод полиэлектролитов до или после питающего насоса высокого давления фильтр-пресса, в реакторы или в трубопровод с соответствующей системой автоматизации (см. п. 7)

3.2. Термическое кондиционирование

Нагревание осадка до нужной температуры (от 180 до 200 °С) в течение 30–60 мин приводит к необратимым трансформациям его физической структуры, значительно снижая его удельное сопротивление, особенно если осадок содержит большое количество органических веществ.

Во время термической обработки коллоидные гели разрушаются, а гидрофильность частиц (способность к поглощению влаги) значительно снижается, и, таким

образом, плотность частиц заметно увеличивается. Одновременно протекают два процесса.

- коллоидное растворение определенных взвешенных веществ;
- выделение в осадок некоторых растворенных веществ

В результате термообработки клетчатка подвергается небольшим разрушениям, а жиры остаются относительно стабильными

В зависимости от типа осадков в результате термической обработки растворяется от 20 до 40 % органических веществ, вследствие чего выделяется межчастичная жидкость с БПК₅ примерно от 3000 до 6000 мг/л (отношение ХПК–БПК₅ — около 2,5). Самые высокие результаты получаются при термической обработке свежих осадков. Растворение органики увеличивается с ростом температуры и времени термической обработки.

Азот присутствует в жидкой фазе в относительно высоких количествах (от 0,5 до 1,5 г/л в виде NH₄⁺), однако фосфор и металлы остаются в осадке

3.2.1. Преимущества термического кондиционирования

Выбор такого типа кондиционирования особенно на больших очистных сооружениях часто бывает привлекателен ввиду следующих преимуществ

- улучшение структуры осадка, обеспечивающее возможность проведения **фильтрации без добавления реагентов**, температура оказывает основное влияние на фильтруемость, и для термической обработки достаточно чуть больше получаса;
- **очень высокое содержание сухого вещества** в кеке фильтр-пресса (обычно эта величина больше 50 % СВ, что значительно выше значений, получаемых в результате химического кондиционирования);
- получение обезвоженных и **стерилизованных** осадков без добавления каких-либо реагентов; таким образом, эти осадки можно снова внести в почву;
- оптимальное использование биогаза, сочетание анаэробного сбраживания и термического кондиционирования остается самым привлекательным с точки зрения применения в технологических линиях обработки осадков на больших очистных сооружениях (более миллиона жителей);
- **стабильность** получаемых результатов (которые мало зависят от изменения концентрации);
- **быстрое и интенсивное уплотнение** после термической обработки

3.2.2. Эксплуатационные ограничения

Несмотря на высокую эффективность термического кондиционирования, оно имеет следующие ограничения

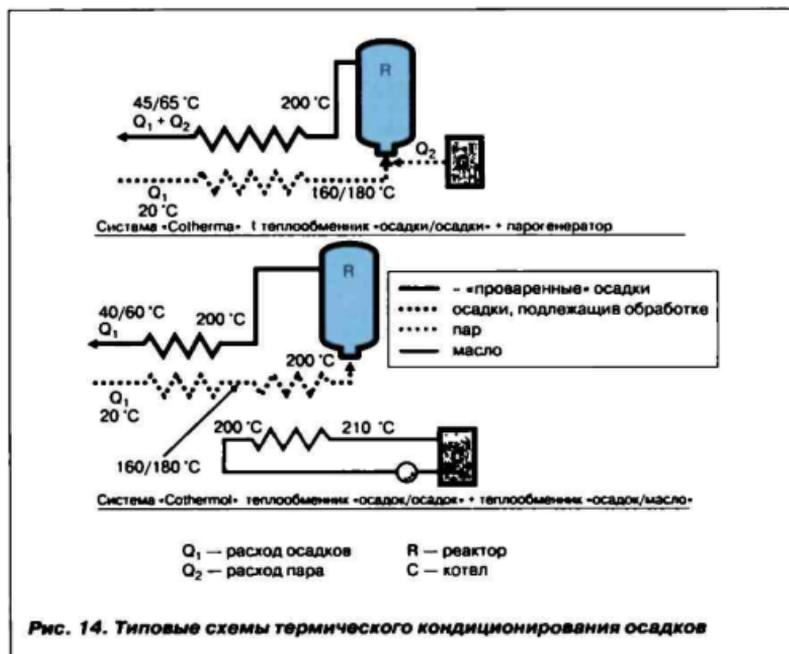
- **рециркуляция остаточного концентрированного раствора на вход в очистные сооружения** перегрузка по БПК₅ составляет от 10 до 25 % — загрязнения в большей части растворимые, с большим содержанием азота и содержащие твердую фракцию ХПК (за счет аэробного или анаэробного воздействия), они могут производить почти ингибирующее действие (при анаэробном процессе);
- **выделение запахов** термически обработанные осадки выделяют очень сильные запахи, поэтому необходимо предотвратить любые газовые выбросы в атмосферу (отсюда необходимость в крытых сооружениях, оснащенных системой вентиляции и уничтожения запахов) и предусмотреть конечное охлаждение осадков, прошедших термическую обработку;
- **необходимость периодических очисток поверхностей теплообмена**, что, в частности, не позволяет применять этот способ для обработки осадков с высоким содержанием кальция

3.2.3. Реализация термической обработки осадков

На рис. 14 показаны самые распространенные схемы функционирования. При любом варианте необходимо вернуть тепловую энергию (калории), полученную от нагретых осадков, чтобы направить ее на нагревание подлежащих тепловой обработке осадков таким образом, чтобы расход тепловой энергии извне соответствовал дополнительному нагреву осадков на не более чем 40 °С. Такая рекуперация проводится в противоточных трубчатых теплообменниках. Всегда целесообразно установить отдельный реактор, обеспечивающий соблюдение минимального времени «варки» (обработки осадков) при контролируемой температуре.

Подача тепловой энергии производится

- либо за счет прямой инъекции острого пара в реактор (система «Cotherma»),
- либо посредством непрямого теплообмена с неиспаряющимся теплоносителем, например с маслом (система «Cothermol»).



В условиях контролируемой эксплуатации и достаточной теплопередающей поверхности расходы энергии будут следующими:

- при прямой инъекции острого пара — от 60 до 90 кВт · ч/м³ осадка;
- при непрямо́й подаче тепла с помощью теплоносителя — от 40 до 70 кВт · ч/м³ осадка.



Фото 6. Установка на очистных сооружениях «Achéres». Термическое кондиционирование сброженных осадков

Опыт показывает, что данный способ очень надежен и эффективен при применении — на больших очистных сооружениях (объем реактора более 30 м³) (фото 6); — для обработки сброженных осадков.

В табл. 6 представлены обобщенные данные различных видов кондиционирования (см. пп. 3.1 и 3.2) осадков перед той или иной технологией обезвоживания.

Таблица 6
Стандартные виды кондиционирования для уплотнения и обезвоживания осадков

Тип кондиционирования	Уплотнитель	Уплотнение (рошетки, барабаны, стволы процеживания, центрифуги)	Ленточные фильтры	Центрифуги	Фильтр-пресс
Не требуется		+			
	*				
Гашеная известь	(блокирование ферментации)				+
Полиэлектролит		**	**	**	+
FeCl ₃ + известь					**
FeCl ₃ + полиэлектролит			+	+	**
Полиэлектролит + структурирующая целлюлоза				+	+
Термическое					+

Примечание ** — этот тип кондиционирования применяется чаще всего, + — кондиционирование возможно

3.3. Другие виды кондиционирования

Существуют и другие виды кондиционирования, которые применяются довольно редко либо в силу высоких инвестиций или эксплуатационных затрат, либо из-за их низкой эффективности и ненадежности.

3.3.1. Замораживание и размораживание

При полном застывании осадочной массы в процессе замораживания вода превращается во множество ледяных пластинок, а электролиты концентрируются в осадке. Это позволяет эффективным образом сократить значительное количество воды, связанной с твердыми частицами. Такое качество массы сохраняется и после таяния льда, и, таким образом, способность осадка к фильтрации значительно повышается.

До настоящего времени методика замораживания/размораживания применялась при обработке осадков с преобладающим содержанием минеральных веществ, которые с трудом поддаются обезвоживанию, и особенно осадков, содержащих гидроксид алюминия, образующихся в производстве питьевой воды или в процессе обработки промышленных вод. Такой тип кондиционирования, требующий больших энергетических расходов и применяемый в сочетании с вакуум-фильтрацией, позволяет получить осадки с содержанием сухого вещества выше 30 %.

3.3.2. Кондиционирование с помощью наполнителей

Введение сухих и обычно инертных веществ улучшает когезию осадка и особенно его коэффициент сжимаемости. При кондиционировании жидких осадков добавление таких веществ (CaCO_3 , гипса, опилок, летучей золы, угля и т. д.) позволяет снизить дозы обычно применяемых реагентов, но не дает возможности полностью от них отказаться. Основной эффект заключается в улучшении текстуры кека, что либо способствует хранению и транспортировке продукта, либо облегчает работу аппаратов обезвоживания. Например, практикуется добавление карбонатов в биологические осадки или добавление опилок и других волокнистых веществ в масляные осадки перед обработкой на ленточных фильтрах.

Всегда выгодно совмещать обезвоживание «трудных» осадков (гидроксидов, биологических) с обработкой плотных минеральных осадков (содержащих продукты декарбонатации, мокрой газоочистки, сульфат кальция, отходы бумажной промышленности и т. д.). Для того чтобы введение наполнителей было эффективным, их дозы должны составлять примерно от 20 до 40 % от исходных взвешенных веществ осадка. Добавление наполнителей в предварительно обезвоженный кек может также преследовать следующие цели:

- «искусственное» увеличение содержания сухого вещества перед захоронением или утилизацией кека (например, добавлением CaO или опилок),
- снижение коэффициента сжимаемости осадка перед вторым этапом обезвоживания: добавление летучей золы в осадок на ленточном фильтре, перед поступлением в фильтр очень высокого давления (от 10 до 40 бар).

3.3.3. Кондиционирование с помощью электроосмоса

Данная методика основана на совместном действии следующих процессов
— предварительная флокуляция, которая всегда необходима при обработке осадка,

— электроосмос, который за счет воздействия постоянного электрического поля отсасывает воду из капилляров и выводит ее на поверхность катода

Такой тип кондиционирования был разработан специально для обработки огнеупорных осадков классическим механическим обезвоживанием (например, жиродержащих гидрофильных осадков) и позволяет увеличить содержание сухого вещества на 5–10 пунктов. Однако применение этого метода в промышленных масштабах остается очень ограниченным из-за необходимости высоких инвестиций и эксплуатационных затрат.

Работы по повышению эффективности ленточного фильтра с помощью электроосмоса находятся пока еще на уровне разработки и испытаний прототипов.

3.3.4. *Инертные материалы для обезвреживания токсичных осадков*

Для обезвреживания токсичных осадков используются как отдельные материалы, так и их комбинации: портландцемент, шлакопортландцемент, силикат натрия, гипс, летучая зола, шлаки, органические смолы и т. д.

Обработка такого рода не является собственно методом кондиционирования, так как после такой процедуры, проведенной на жидких сточных осадках, обработанная масса не подвергается механическому обезвоживанию, а постепенно затвердевает.

В зависимости от вводимых доз можно получать пастообразную, густую или твердую массу, которую можно захоронить, так как большинство входящих в ее состав металлов связаны химически (не вымываются). Тем не менее такие способы имеют значительные ограничения из-за увеличения объема жидкого осадка, и в связи с этим существует необходимость больших дозировок реагентов (от 15 до 35 % от веса жидкого осадка). Способы получаются дорогостоящими и поэтому применяются только в специализированных центрах обработки токсичных осадков.

4. Стабилизация жидких осадков

Термин «стабилизация» подразумевает целый комплекс процессов, применяемых в обработке осадков, которые позволяют:

— либо использовать способность к сбраживанию компонентов, которые легко поддаются биологическому разложению и удалению, что позволяет безопасно складировать осадки и сокращать их массу, подлежащую вывозу с сооружений, — либо блокировать анаэробное сбраживание, которое вызывает появление запахов и снижает способность осадков к обезвоживанию.

Кроме того, эти процессы обладают **обеззараживающим действием**, выраженным в большей или меньшей степени (сокращение количества патогенных организмов, содержащихся в осадках).

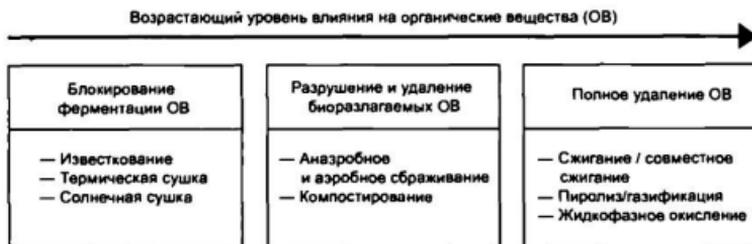
Для управления процессами брожения органических веществ необходимо удалить фракцию, легко биологически разлагаемую. Это можно сделать либо аэробным способом (в этом случае говорят о биологической стабилизации или об аэробно-термофильном сбраживании), либо анаэробным способом (мезофильное или термофильное анаэробное сбраживание). Если рассматривать идеальный вариант, то при удалении этой органической фракции риск появления запахов даже при длительном хранении осадков сводится к нулю.

Для **блокирования** неконтролируемых процессов ферментации необходимо затормозить активность микроорганизмов, присутствующих в осадке. Это можно сделать, меняя такие параметры, как температура (пастеризация или термическая

сушка), уровень pH (известкование осадков) и степень удаления воды (термическая сушка, солнечная сушка). Перечисленные процессы также воздействуют и на патогенные организмы и в большей или меньшей степени обеззараживают осадок

В гл. 19, п. 1, будет показано, что компостирование является биологическим аэробным термофильным процессом, который можно проводить на обезвоженных органических осадках. Кроме того, компостирование позволяет контролировать процессы брожения и проводить частичное обеззараживание осадка.

Очевидно, что при полном удалении органических веществ из осадка он становится полностью инертным. Этого можно добиться с помощью таких процессов, как сжигание, пиролиз/газификация и жидкофазное окисление (см. гл. 19, пп. 2–6).



Биологическая стабилизация применяется лишь в отношении осадков с высоким содержанием биоокисляемых веществ (обычно более 50 % сухого вещества), т. е. — осадков, получаемых при простом отстаивании городских сточных вод, или **первичных осадков**;

— осадков, прошедших биологическую аэробную обработку со средней и с высокой нагрузкой (избыточные активные илы; осадки орошаемых бактериальных фильтров, осадки, получаемые после промывки биофильтров), которые часто называют сокращенно **биологическими осадками**;

— смесей осадков двух упомянутых выше типов, или **смешанных осадков**;

— осадков от биологической аэробной обработки с низкой нагрузкой без первичного отстаивания (избыточный активный ил), или **осадков от продленной взрости**.

Свежими называются осадки до их стабилизации, а **стабилизированными** или **сброженными осадками** называются осадки после стабилизации. На практике термин **сброженные осадки** применяют чаще всего в отношении осадков, прошедших стабилизацию анаэробным способом

4.1. Анаэробное сбраживание

Метановое брожение (см. гл. 4, п. 3) является одной из самых сильных биотехнологий с точки зрения разлагающей способности и позволяет удалять значительные количества органических веществ. Анаэробное сбраживание осадков обычно применяется без рециркуляции сброженных сгущенных осадков, так как время пребывания в реакторе и начальная концентрация органических веществ в осадке позволяют проводить синтез бактериальной флоры без риска выщелачивания (вымывания).

Образование газа — самый простой и показательный критерий качества сбраживания. Газообразование в основном зависит от трех факторов

- температура;
- время пребывания в метантенке;
- степень стабилизации органических веществ, участвующих в процессе сбраживания.

При работе на сооружениях очистки ГСВ основной задачей анаэробного сбраживания обычно является сокращение на 40–50 % органических веществ в смешанных осадках.

Сбалансированное сбраживание приводит к образованию от 900 до 1100 л газа при разложении 1 кг органических веществ. Этот газ состоит в основном из CH_4 (от 60 до 65 % по объему) и из CO_2 (от 35 до 40 % по объему). В образующемся газе могут также присутствовать в очень небольших количествах и другие элементы: CO , N_2 , углеводороды, H_2S , меркаптаны, летучий органический углерод. Значение низшей теплотворной способности (НТС) зависит от доли CH_4 . Обычно оно находится в пределах 21 300–23 400 кДж/Нм³ (5 100–5600 ккал/Нм³).

Влияние температуры является решающим для нормальной работы метантенка — оно обеспечивает быстрый запуск, стабильность процессов ферментации и газообразования.

Обычно применяется **мезофильная ферментация** при температуре около 35 °С. **Термофильная ферментация** (50–60 °С) применяется реже. Она позволяет сократить в два раза объем реакторов, а также удалить значительно большее количество патогенных организмов, однако все это увеличивает энергетические затраты.

Прекрасным компромиссом может стать **двухфазное анаэробное сбраживание**, которое позволяет

- обеспечить быстрый гидролиз органических веществ в первом термофильном реакторе с коротким временем пребывания в реакторе,
- оптимизировать фазу метанизации во втором мезофильном реакторе.

4.1.1. Параметры, влияющие на результат анаэробного сбраживания

Важнейшими параметрами при определении размеров наряду с температурой являются **время пребывания в реакторе** (которое связано с суточным поступлением свежих осадков) и **органическая нагрузка**

$$t_{\text{дн}} = V / Q_{\text{б}} \text{ и } \text{CO} = \left(C_{\text{б}} \frac{\text{MO}_{\text{б}}}{100} Q_{\text{б}} \right) / V,$$

где

$t_{\text{дн}}$ — время гидравлического пребывания, сут.

V — объем реактора, м³;

$Q_{\text{б}}$ — поступление свежих осадков, м³/сут.

CO — нагрузка по органическим веществам, кг $\text{CO}/(\text{м}^3 \text{ сут})$.

$C_{\text{б}}$ — концентрация взвешенных веществ в свежих осадках, г/л.

$\text{MO}_{\text{б}}$ — процентное соотношение органических веществ к взвешенным веществам, %

Требуемое время пребывания в реакторе обеспечивается

- при достаточном объеме реактора,
- при достаточно высокой концентрации свежих осадков, сокращающей подлежащие обработке расходы.

На рис. 15 показано изменение CO в зависимости от $t_{\text{пр}}$ и от C_0 , а также указаны зоны нормального функционирования различных типов анаэробных метантенков (см п 4)

Примечание Всегда можно увеличить время пребывания осадков в реакторе для того, чтобы не превысить максимальные нагрузки (такие зоны показаны пунктирной линией)

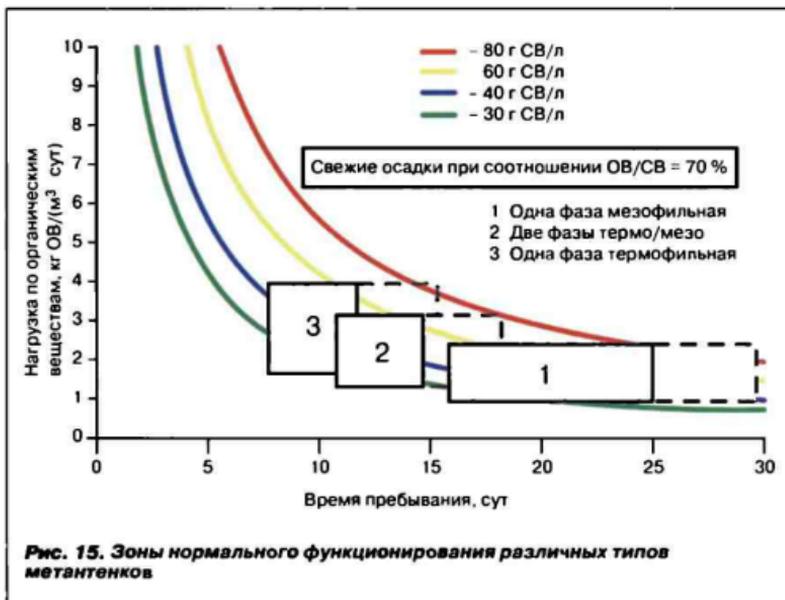


Рис. 15. Зоны нормального функционирования различных типов метантенков

Повысить результат и улучшить работу метантенков могут также три других параметра, а именно

- **интенсивность перемешивания**, которое является более полезным для метанового сбраживания осадков (вязких), чем для метанизации сточных вод. Эффективное перемешивание нивелирует перепады температур и концентраций органических веществ в массе метантенка, а также способствует реакциям между микроорганизмами и веществами, которые надлежит разложить. Расхождение, которое может наблюдаться между эффективностью лабораторных метантенков и эффективностью, всегда меньшей, промышленных аппаратов, часто объясняется различием в интенсивности перемешивания,
- **бесперебойность питания** — подача свежих осадков и отбор сброженных осадков должны производиться бесперебойно, чтобы не нарушать развития микроорганизмов,
- **содержание, происхождение и структура органических веществ**, так как эти параметры влияют на эффективность удаления таких веществ. Обычно наи-

лучший результат получается при высоком содержании органических веществ (первичные осадки и/или осадки от сооружения с большими нагрузками) И наоборот, эффективность удаления органических веществ может снизиться до 30–40 % при обработке осадков от сооружения длительной азрации Предварительная механическая, термическая и даже химическая обработка может способствовать биоразложению органических веществ и таким образом повысить эффективность сбраживания (см п 4 1 8)

4.1.2. Результаты и преимущества сбраживания

Свежие осадки ГСВ имеют серый или желтоватый цвет Они содержат фекальные вещества, овощные отходы, волокна и т д и обладают неприятным запахом Осадки, полностью прошедшие сбраживание, имеют черный цвет (сульфида железа) и выделяют слабый запах, похожий на запах дегтя В них уже практически невозможно обнаружить исходные компоненты (за исключением волос, шерсти, некоторых зерен и пластмассовых отходов), 90 % бактерий сальмонеллы и большая часть патогенных организмов разрушаются, однако вирусы и яйца глистов уничтожаются не так эффективно. Работа со сброженными осадками на открытом воздухе больше не приводит к негативным последствиям и не ведет к возобновлению ферментации даже после длительного хранения (в отличие от химической и даже азробной стабилизации)

■ Сокращение процентного содержания органических веществ в осадках

Примем следующие обозначения

m_1 — содержание минеральных веществ в свежих осадках (по отношению к содержанию ВВ), %.

m_2 — содержание минеральных веществ в сброженных осадках (по отношению к ВВ), %.

x — сокращение органических веществ, полученное с помощью сбраживания, рассчитывается по следующей формуле

$$x = 1 - \frac{m_1(100 - m_2)}{m_2(100 - m_1)}$$

Эта формула выведена на основании предположения, что минеральные вещества сохраняются с момента поступления в метантенк и до выхода из него Она приближенная, так как не учитывает, что в процессе сбраживания происходят изменения, касающиеся концентрации карбонатов Тем не менее на практике такой расчет остается наиболее надежным

При обработке осадков ГСВ сокращение органических веществ на 40–50 % соответствует удалению 1/3 сухих веществ. Вследствие этого на следующей стадии обработки количество аппаратов обезвоживания сокращается Кроме того, благодаря большой буферной емкости метантенков режим их работы может быть абсолютным стабильным (расход, концентрация и качество осадков)

Примечание Опыт показывает, что способность сброженных осадков к обезвоживанию практически остается такой же, как и у соответствующих свежих осадков

Преимущество анаэробного сбраживания состоит в том, что в этом процессе вырабатывается энергия, которая может накапливаться в виде биогаза, образующегося в избыточных количествах по сравнению с термическими потребностями установки сбраживания

Например, при обработке свежих смешанных осадков с умеренным соотношением органических и взвешенных веществ, равным 70 %, около 1/3 получаемого био-

газа будет достаточно для нагрева метантенка, а 2/3 остается свободным для дальнейшего использования.

Хранят такие газы обычно в гибких газгольдерах, в газосборном колоколе (при давлении, близком к атмосферному) или в сферических газгольдерах под давлением в несколько бар. При использовании биогаза (отопление, сушка и сжигание осадков, одновременное генерирование энергии) необходимое время хранения составляет 6–8 ч.

4.1.3. Утилизация биогаза

Напомним, что низшая теплотворная способность (НТС) метана равна 35 865 кДж/Нм³, или 8580 ккал/Нм³. Величина НТС биогаза изменяется исключительно в зависимости от содержания метана (НТС биогаза, содержащего 65 % метана, составляет 23 300 кДж/Нм³, или 5550 ккал/Нм³).

Кроме нагрева избыток газа может служить мощным источником электроэнергии. Таким образом, простое сооружение первичного отставания ГСВ с последующим сбраживанием может существовать автономно по потреблению электроэнергии. Очистные сооружения биологической обработки могут иметь сбалансированное энергетическое управление, если режим аэрации достаточно экономичен с точки зрения потребления энергии (например, применение активного ила с воздушной мелкопузырчатой аэрацией или орошаемых бактериальных фильтров) и если обработка осадков достаточно проста.

Энергетическая утилизация биогаза зачастую требует применения дополнительных средств обработки для удаления его некоторых компонентов (табл. 7).

Цель утилизации биогаза	Оборудование	Обработка
Нагрев метантенков	Котел на биогазе / жидком топливе или биогазе / природном газе	Отсутствует, но есть риск коррозии от H ₂ S и воды. Возможны отложения и истирания из-за пыли.
Отопление помещений	Котел на биогазе / жидком топливе или биогазе / природном газе	
Сушка осадков	Котел на биогазе / жидком топливе или биогазе / природном газе	
Горючее для печей сжигания	Горелка	
Производство электричества	Совместное производство энергии Газовые моторы или моторы на жидком топливе Газовые турбины	Удаление воды, H ₂ S, пыли
Хранение под высоким давлением	Промышленный аппарат под давлением, молекулярные сита	Удаление воды, CO ₂ , H ₂ S и металлов

■ **Пример утилизации биогаза: совместное производство энергии на очистных сооружениях «Achères»**

Эти очистные сооружения (завод СИААП расположен в низовье Сены) обрабатывает в сутки около 2 млн м³ сточной воды, поступающей из Парижского региона. По-

лученные осадки стабилизируются с помощью анаэробного мезофильного сбраживания в 28 метантенках, общий объем которых составляет 260 000 м³ Биогаз, суточное производство которого составляет 160 000 Нм³, превращают в источник тепла и электроэнергии, используя следующее оборудование.

- семь дизельно-газовых моторов мощностью 1200 л.с., которые подают энергию на два генератора переменного тока 1050 кВ·А и пять воздухоподувок (получение воздуха),
- семь дизельно-газовых моторов мощностью 1700 л.с., которые подают энергию на три генератора переменного тока 1440 кВ·А и четыре воздухоподувки,
- газовая турбина, от которой работает генератор переменного тока 4 МВт,
- котел биогаза для нагревания метантенков (горячей водой),
- котел биогаза для производства пара (для термической обработки осадков).

Газовая турбина имеет производительность от 3 до 4 МВт (в зависимости от температуры всасываемого воздуха) и позволяет рекуперировать 7 МВт на выхлопных газах. Общее энергопотребление представлено в табл. 8

Таблица 8

Общее энергопотребление на очистных сооружениях «Achères»

Потребление	Производство
Биогаз 48 768 Нм ³ /сут (27 т в пересчете на нефть)	Электрическая энергия 88 800 кВт·ч/сут (7,6 т в пересчете на нефть), электрический КПД 28 %
	Термическая энергия 160 000 ккал _н /сут (16 т в пересчете на нефть), тепловой КПД 59 %
Общий КПД 87 %, или 23,6 т в пересчете на нефть в сутки	

Таким образом, совместное производство энергии из биогаза позволяет одновременно получить источник тепла и механической энергии (так как приводятся в движение генераторы переменного тока). По сравнению с традиционными системами получения тепловой и электрической энергии совместное получение энергии позволяет сэкономить до 35 % первичной энергии

4.1.4. Типы и расчет параметров метантенков для сбраживания осадков

4.1.4.1. Мезофильное сбраживание (35–40 °С)

Установка по сбраживанию осадков мезофильного типа состоит из одного или нескольких параллельных реакторов, после которых обычно устанавливается сборный резервуар-накопитель сброженных осадков, позволяющий приспособиться к темпу процесса обезвоживания. Время пребывания осадков в реакторе и органические нагрузки были указаны ранее (см. п. 4.1.1, рис. 15), а преимущества и недостатки метода приведены в табл. 9

Таблица 9

Преимущества	Недостатки
<ul style="list-style-type: none"> - Упрощенная эксплуатация - Наиболее распространенный способ (используется на более чем 90 % существующих установок) - Усреднение (гомогенизация) - Производится больше свободного биогаза 	<ul style="list-style-type: none"> - Высокие инвестиции - Чувствительность к пиковым нагрузкам (максимально от 8 до 15 % суточной перегрузки в зависимости от состояния метантенка)

4.1.4.2. Термофильное сбраживание (50–60 °С) (табл. 10)

Таблица 10

Преимущества	Недостатки
<ul style="list-style-type: none"> - Незначительные капиталовложения (работа идет при более высоких нагрузках) - Обеззараживание осадков порциями или частично порциями - Более полное удаление органических веществ (от 2 до 5 % от общего количества органических веществ) 	<ul style="list-style-type: none"> - Меньше возвращаемой (рекуперированной) энергии - Большие объемы возвратов в головные сооружения станции (ХПК) - Более сложная эксплуатация - Больше реагентов для обезвреживания

4.1.4.3. Двухфазное анаэробное сбраживание

В основе этой технологии лежит простой принцип разделения двух основных этапов анаэробного сбраживания: фазы гидролиза/подкисления и фазы метаногенеза (получения CH_4) (см. гл. 4, п. 3).

Эти два этапа фундаментально отличаются друг от друга:

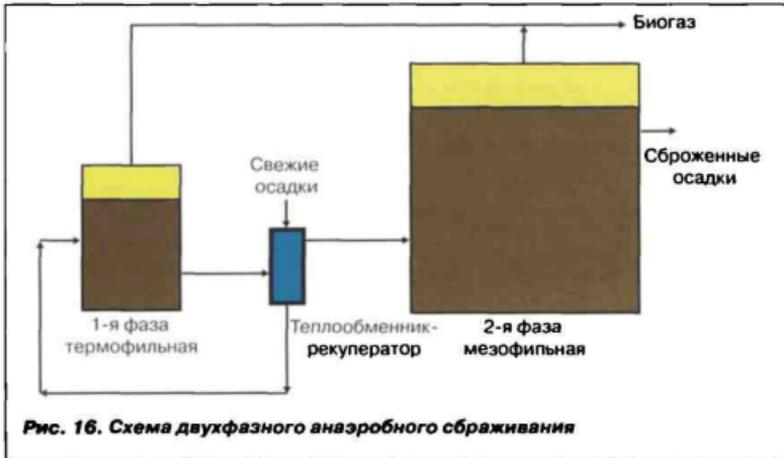
- используют различные популяции бактерий, которые, в свою очередь, требуют разных оптимальных условий работы,
- кинетические показатели различны

■ Реализация (рис. 16)

Для оптимизации работы, как было указано, эти два этапа разделяют. Параметры, обеспечивающие стабильную работу на каждом этапе, следующие.

- фаза 1 — гидролиз органических веществ, в среднем время гидравлического пребывания составляет 2 сут при температуре 55 °С;
- фаза 2 — получение биогаза, в среднем время гидравлического пребывания составляет 10 сут при температуре 37 °С (при этом органические вещества становятся абсолютно стабильными на выходе).

Эта двухфазная линия обработки позволяет значительно сократить общие объемы реакторов по сравнению с классическим сбраживанием и эффективней разрушить присутствующие патогенные организмы.



Необходимо установить промежуточный теплообменник между входом осадков в первую фазу и выходом осадков из нее для того, чтобы охладить осадки до их поступления в мезофильный реактор второй фазы

Рекуперированная тепловая энергия используется для предварительного нагрева свежих осадков

■ Преимущества двухфазного анаэробного сбраживания

Кроме сокращения времени пребывания осадков в реакторе и, следовательно, объемов реакторов сбраживания данная технология имеет следующие преимущества

- допускает гораздо большие изменения нагрузок, чем классические способы. Это очень важное преимущество с учетом различий в количестве получаемых осадков на очистных сооружениях (разные периоды пиковых нагрузок, сезоны дождей). Таким образом, первый этап, который рассчитан на время пребывания в реакторе в среднем 2 сут, может быть сокращен до 1,5 сут без потери при этом своей эффективности,

- позволяет обрабатывать более вязкие осадки, так как при предварительном нагревании до 55 °С они становятся более текучими, что обеспечивает более стабильную их подачу на мезофильную обработку,

- обеспечивает лучшее качество осадков, поступающих на второй этап обработки, так как после гидролиза осадки остаются более текучими даже при 35 °С, и, следовательно, их перемешивание (гомогенизация) будет протекать легче.

За 2–3 дня пребывания в реакторе при 55 °С в осадках разрушается большая часть патогенных бактерий, особенно сальмонелл, что чрезвычайно важно, так как влияет на дальнейшую обработку осадков, которую надо будет проводить после обезвоживания и перед отгрузкой для использования в сельскохозяйственном секторе.

В целом эффективность этой технологии сопоставима с результатами классического сбраживания при условии одинакового качества и количества подлежащих обработке осадков.

Способ 2PAD компании «Дегремон» является особенно привлекательным для расширения возможностей существующего цеха сбраживания путем размещения термофильного метантенка в начале технологической линии. В качестве примера можно привести очистные сооружения в Экс-ан-Провансе.

Таблица 11

Параметры работы очистных сооружений в Экс-ан-Провансе

	Сбраживание, 1-я фаза
Максимальный объем обрабатываемых осадков станции после реконструкции, м ³ /сут	300
Время пребывания осадков при сбраживании, сут	21
Общий объем существующего метантенка, м ³	3300
Процент осадка, который можно обработать	52
Дополнительный объем сбраживания, требуемый для обработки 100 % осадков, м ³	3000

Для полной обработки 100 % осадков на новых очистных сооружениях был установлен термофильный метантенк общим объемом 700 м³, благодаря чему общий объем сбраживания составил 4000 м³ (вместо 6300 м³ при классическом сбраживании), а время пребывания осадков при максимальной производительности — 13 сут (табл. 11)

На рис. 17 представлена новая схема технологической линии обработки осадков на реконструированных очистных сооружениях. Следует обратить внимание на возможность обработки осадков дождевых вод с помощью анаэробного сбраживания. Установка доочистки Densadeg, используемая для физико-химической дефосфатации в сухой период года, автоматически переходит в режим первичной обработки в дождливое время, при этом допускаются органические перегрузки



Американская организация EPA (Environmental Protection Agency — Управление по охране окружающей среды) в сентябре 2002 г. присвоила способу **2PAD** компании «Дегремон» статус национального стандарта PFRP при условии соблюдения всех необходимых требований (см. гл. 2, п. 6.3). Эти требования относятся к работе в определенной последовательности, что обеспечивает обеззараживание всей массы осадков.

4.1.5. Общие расчетные данные

В табл. 12 приведены расчетные данные параметров, которые обычно имеют метантенки осадков в соответствии с выбранными конфигурациями.

Таблица 12

Параметры различных технологических линий анаэробного сбраживания

Параметр	Мезофильное сбраживание, 1-я фаза	Сбраживание в 2 фазы		Термофильное сбраживание, 1-я фаза
	1-я стадия	Фаза 1 (термофильная)	Фаза 2 (мезофильная)	1-я стадия
Время пребывания, сут	16–25	1,5–3,0	8–12	8–12
Нагрузка по органическим веществам, кг/(м ³ сут)	1,5–2,5 ¹	10–30 ¹	2–4 ¹	2,5–5,0 ¹

¹ Только для пиковых периодов

4.1.6. Концепция метантенков осадков компании «Дегремон»

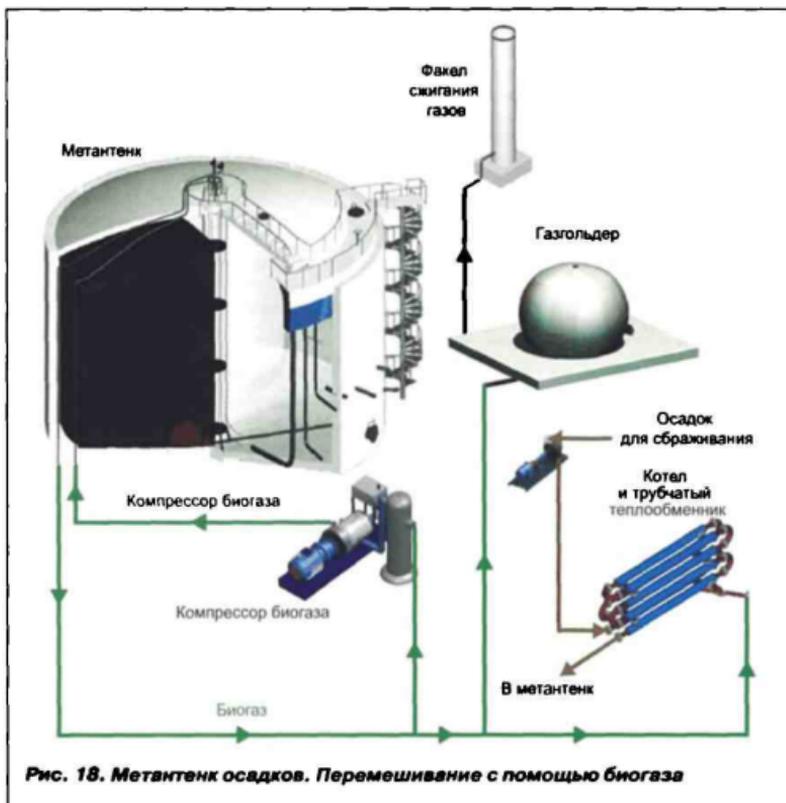
4.1.6.1. Перемешивание в метантенках

Интенсивное перемешивание необходимо для того, чтобы

- обеспечить контакт всех введенных с очищающей биомассой питательных компонентов,
- обеспечить однородность распределения температуры,
- минимизировать накопление отложений

■ Перемешивание с помощью биогаза

Самый надежный способ — перемешивание с помощью биогаза (рис. 18). Отводимый газ снова вводится под давлением в массу осадков. Если область инъекции газа находится в центральной зоне и в основании метантенка, то происходит мощное «вдоворотное» перемешивание (при условии соблюдения соответствующего соотношения диаметр/высота устройства), которое направлено от центра к периферии. Расход газа, поступающего в метантенк для обеспечения такого перемешивания, составляет не менее $0,8 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$. Компания «Дегремон» стандартизировала эти оснащенные погружными трубками устройства перемешивания. При этой испытанной технологии потребление энергии составляет 5–6 Вт на 1 м^3 метантенка



Компания «Дегремон» также разрабатывает способ **Cannon Mixer**. Эта технология перемешивания биогазом (фото 7) заключается в том, что инъекционные трубки заменяются «пушками» — трубками диаметром 450, 600 и 750 мм, которые засасывают осадки в различных точках метантенка с помощью генераторов макропузырьков. Таким образом генерируется поршневое движение, которое отличается особой энергетической эффективностью. Данная технология может быть прежде всего предложена для метантенков, работающих с большими объемами осадков.

■ Механическое перемешивание

Эта технология должна применяться с соблюдением следующих минимальных условий:

- соотношение высота/диаметр метантенка должно быть больше единицы;
- дно метантенка должно быть наклонным во избежание накопления отложений;
- осадки должны пройти предварительную обработку для удаления волокон

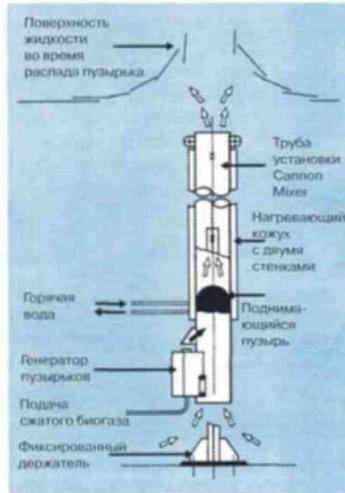


Фото 7. Фотография и схема перемешивателя Saprol Mixer

При несоблюдении данных условий перемешивание может оказаться малоэффективным (ограничение рабочего полезного объема метантенка) и трудным в практическом применении (необходимость регулярно извлекать движущиеся части, в которые будут забиваться волокна)

4.1.6.2. Нагрев метантенков

Надежнее всего осуществлять нагрев в процессе сбраживания с помощью внешних однострунных теплообменников, которые снабжаются горячей водой и устанавливаются в системе рециркуляции осадков. При условии соблюдения определенных правил безопасности (дробление, размельчение частиц, отсутствие перегородок и т. д.) можно также использовать и спиралевидные теплообменники, которые имеют меньшую скорость циркуляции и проходное сечение.

Кроме нагрева свежих осадков нагревательная система должна компенсировать внешние тепловые потери. Коэффициент теплопередачи зависит от используемых материалов и условий установки метантенка на земле (необходимо обратить внимание на негативное влияние грунтовых вод, омывающих цоколь метантенка).

В странах с умеренным климатом в первом приближении можно считать, что для емкостей меньше 1000 м^3 внешние тепловые потери составляют от 2100 до $2500 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$ [от 500 до $600 \text{ ккал}/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$], для емкостей больше 3000 м^3 — $1250 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$ [$300 \text{ ккал}/(\text{м}^3 \cdot \text{сут})$].

Теплоизоляция метантенков обычно достигается за счет двойных стен, при этом промежуточное пространство либо остается пустым, либо наполняется изоляционным (пеннообразным) материалом. На больших сооружениях также устанавливаются композитные стены. Для небольших объемов обрабатываемого осадка бетонную конструкцию можно поменять на стальную с соответствующей защитой поверхности.

Правильно рассчитанная система перемешивания газом позволяет строить метантенки с большим горизонтальным сечением и с днищем, имеющим небольшой



Фото 8. Восемь метантенков объемом 16 000 м³. Сооружение «La Farfala» (Сантьяго, Чили). Производительность 760 000 м³/ч

уклон (на фото 8 представлено сооружение «La Farfala» в Чили, которое включает восемь метантенков объемом 16 000 м³ и диаметром 34 м каждый).

Наличие большой свободной площади облегчает отвод газа и значительно сокращает риск пенообразования, который особенно высок при запуске процесса в метантенках «вертикального» типа. Кровля сооружения чаще всего выполняется в виде стационарного купола.

Периодическое опорожнение метантенков (чистку проводят каждые 10–15 лет в зависимости от качества имеющейся предварительной обработки) должно быть частью нормального технического обслуживания. Эта процедура необходима, чтобы удалить песок и шлам, которые со временем накапливаются на дне сооружения и сокращают

полезную емкость. Кроме того, рекомендуется всегда проводить тщательную очистку поступающей сточной воды от песка.

■ Техническое решение «Digéco» (рис 19)

Разработанный принцип основывается на том, что в одном и том же корпусе находятся как сооружения по сбраживанию осадков, так и отсек хранения биогаза. Таким образом, купол метантенка и его антикоррозионная обшивка заменяются гибким газгольдером с двойной мембраной и с удлиненной внутренней мембраной, которая погружается ниже уровня осадков.



Способ «Digesco» все более широко применяется на очистных сооружениях производительностью от 20 000 до 150 000 ЭЖ для мезофильного и термофильного сбраживания

4.1.7. Запуск установки для сбраживания и управление ею

4.1.7.1. Общие положения

Для контроля за установками метанового сбраживания, включающими в себя только один реактор, применяются общие правила, приведенные в гл 12, п 4 2.

Посев (введение затравки) в метантенке анаэробного сбраживания (эта процедура не является обязательной) сокращает продолжительность времени нарастания нагрузки (с двух до одного месяца) Для метантенков, работающих в термофильном режиме, ситуация иная, так как флора должна адаптироваться к температурным условиям

В любом случае с учетом высокой вязкости суспензий процесс перемешивания имеет огромное значение Перемешивание массы осадков в метантенке должно проходить в непрерывном режиме начиная с момента ввода биогаза.

Иницированию биохимических реакций способствует высокая концентрация осадков В промышленном масштабе нижней границей для осадков городских сточных вод считается концентрация сухих веществ 15 г/л

При пуске метантенка в работу настоятельно рекомендуется провести его нагревание до его номинальной температуры Кроме того, в течение первых недель может потребоваться введение извести для поддержания уровня pH в диапазоне 7,0–7,2

4.1.7.2. Пенообразование в метантенках

Пенообразование, которое происходит из-за неуместного проникновения воздуха, является основной проблемой в работе с метантенками Причины этого процесса разнообразны.

- первая причина, которую следует учитывать, — наличие нитчатых бактерий (*Nocardia*, *Microtrix*) в азотенках (бактерии имеют гидрофобный характер, они склонны к агрегации и всплывают на поверхность в период нахождения в метантенке),
- изменения нагрузки или расхода,
- повышенные температуры ($> 40^{\circ}\text{C}$),
- подача в метантенк уже достаточно сброженных осадков, содержащих большое количество жирных летучих кислот,
- наличие поверхностно-активных веществ, которые недостаточно разложились в сооружениях обработки воды

Пенообразование вызывает значительные трудности при эксплуатации сооружений (неконтролируемые переливы сброженных осадков, возвращение концентрированных осадков в начало цикла, блокировка контуров биогаза и т д) Эти явления могут проявляться как при мезофильной, как и при термофильной обработке и независимо от способа перемешивания (механического или биогазом)

4.1.7.3. Осаждения

В некоторых случаях при наличии магния в сточных водах (что часто вызвано прорывами морской воды в сети канализации) наблюдается **осаждение струвита** MgNH_4PO_4 , который забивает аппараты, установленные после метантенков (трубопроводы, теплообменники, насосы и т д) Для решения данной проблемы необходимо контролировать величину pH, а также вводить соли железа, которые блокируют фосфаты, образуя FePO_4

4.1.8. Способы повышения эффективности анаэробного сбраживания

В поисках повышения эффективности анаэробного сбраживания ставятся различные задачи:

- удалить большее количество органических веществ (выводя со станции как можно меньше осадков) и увеличить получение биогаза (в целях его утилизации на месте),
- улучшить кинетические показатели реакций и уменьшить объемы реакторов (сократить инвестиции).

Для этого предлагаются многочисленные технические решения, среди которых можно перечислить следующие

■ Предварительная термическая обработка

Для такой обработки было разработано много способов, некоторые из них используются в промышленности

Свежие осадки подвергаются интенсивному сгущению и нагреву до температуры 150–180 °С с целью разрушить органическую структуру (термический гидролиз), а затем поступают на мезофильное сбраживание с большой нагрузкой (время пребывания в метантенке — от 10 до 15 сут). При этом не всегда удается добиться максимального удаления органических веществ. При такой обработке возникает риск возникновения веществ меланоидного типа (реакция Майярта), которые с трудом поддаются биоразложению и даже являются токсичными для метанобразующей флоры. Необходимо обеспечить качественный контроль герметичности сооружений, чтобы ограничить выделение неприятных запахов. Особое внимание нужно обратить на возвраты в головные сооружения станции (коллоидное растворение ВВ).

■ Предварительная обработка энзимами

Добавление соответствующего энзимного (ферментного) коктейля в свежие осадки или в метантенки показывает, что кинетические параметры разложения можно увеличить, но очень редко удается добиться большей результативности при удалении органических веществ. Стоимость экзогенных энзимов составляет значительную часть эксплуатационных расходов, однако их введение позволяет воспринимать возникающие избыточные нагрузки

■ Предварительная механическая обработка

Разрушить структуру осадка также можно с помощью таких устройств, как шаровая мельница, экструдеры и др. Хотя такие решения и имеют определенную эффективность, их применение в промышленных масштабах ограничено из-за недостаточной надежности (абразивный износ, засорение, неустойчивость работы во времени)

■ Предварительная обработка ультразвуком

Генерируемые ультразвуковые волны с длиной волны 20–40 кГц вызывают эффект кавитации в обрабатываемой среде. Эта кавитация приводит к размельчению осадков и к частичному коллоидному растворению органических веществ.

В условиях промышленного применения были зарегистрированы случаи увеличения производства биогаза приблизительно на 30 %, что связано с более интенсивным удалением органических веществ

Ультразвук также применяется для разрушения нитчатых бактерий, которые часто встречаются в биологических осадках, с целью снизить риск пенообразования при сбраживании

■ Предварительная химическая обработка

Такие сильные окисляющие реагенты, как озон, также могут использоваться для проведения гидролиза осадков перед сбраживанием. Стоимость производства озона, а также частое присутствие серных восстановленных веществ, которые в первую очередь потребляют озон, ограничивают применение таких реагентов.

4.2. Аэробная стабилизация

4.2.1. Аэрируемое хранение

Аэрируемое хранение не должно рассматриваться как способ стабилизации. Его роль заключается только в сохранении осадков без вредного воздействия на окружающую среду в течение некоторого периода времени, который может длиться несколько месяцев.

На открытых сооружениях в качестве систем аэрации используются либо воздушные диффузоры (например, Vibrair, воздушные насосы, струйные азраторы), либо все реже применяемые поверхностные азраторы. Некоторые системы с течением времени могут вызывать определенные механические разрушения хлопьев активного ила, что впоследствии затрудняет его обезвоживание. Кроме того, такие системы тоже могут вызывать значительные потери тепловой энергии. Вдувание воздуха позволяет также проводить перемешивание и усреднение высококонцентрированных осадков (их концентрация может превышать 30 г/л).

Накопители состоят из одной или нескольких камер. В последнем случае расположение камер в последовательном порядке позволяет достичь более высокого уровня стабилизации и большей однородности осадка, но при этом сокращение количества органических веществ невелико (< 10 %).

4.2.2. Аэробная мезофильная стабилизация

При такой стабилизации уровень минерализации в основном зависит от количества введенного кислорода O_2 , от времени пребывания осадков в реакторе, от температуры, а также от возраста введенных осадков. Не рекомендуется проводить аэробную стабилизацию в странах с холодным климатом без принятия специальных мер. Реактор следует изолировать, поместив его внутрь крытого сооружения, желательно отапливаемого. В наиболее часто встречающихся климатических условиях снижения содержания органических веществ в осадках в процессе аэробной мезофильной стабилизации остается значительно ниже (<< 20 %), чем в условиях анаэробного сбраживания.

Расчетные базовые параметры (табл. 13), приведенные для температуры 20 °С, позволяют провести расчет в первом приближении. Из-за высокой концентрации смеси коэффициент передачи кислорода в данном случае будет намного ниже, чем для чистой воды. Однако чаще всего именно условия минимального перемешивания определяют мощность требуемой системы аэрации.

Чтобы добиться удаления от 25 до 45 % органических веществ, необходимо изменить время пребывания осадков в реакторе и, что особенно важно, количество подаваемого кислорода должно быть очень большим (1 кг O_2 на 1 кг удаляемых органических веществ). Но эти результаты могут быть легко получены на установках, позволяющих поддерживать **термофильные условия работы** (см. п. 4.2.3).

Таблица 13**Элементы расчета сооружений мезофильной аэробной стабилизации осадков**

Время пребывания, сут	Активные илы от сооружений со средней или высокой нагрузкой без первичного отстаивания	12-18
	Первичные осадки + осадки от орошаемых биофильтров + активные илы от сооружений со средней нагрузкой	15-20
Нагрузка по органическим веществам, кг/м ³ реактора в сутки		2
Потребность в кислороде, кг/сут на 1 кг органических веществ в реакторе		0,1

4.2.3. Аэробное термофильное сбраживание

Этот метод напоминает технологию, применяемую для компостирования твердых органических отходов (см. гл. 19, п. 2). В нем используется экзотермический характер реакций окисления для увеличения температуры в реакторе (от 45 до 60 °С). Такое повышение температуры увеличивает скорость реакции, а при достаточно высоких температурах возможно даже определенное обеззараживание массы.

Для получения в реакторе достаточно высокой температуры необходимо предпринять особые меры, чтобы ограничить потери тепла, а именно

- поместить в реактор свежие осадки с минимальной концентрацией органических веществ (от 25 до 30 г/л), что соответствует концентрации взвешенных веществ около 35–40 г/л,
- ограничить потери тепла от испарения, возникающие при насыщении воздуха влагой на выходе из реактора

Установка специальных погружных аэраторов (они комбинируют введение воздуха мелкими пузырьками с механическим перемешиванием), которые очень эффективно обеспечивают диффузию воздуха, а также изолирование и покрытие реакторов, позволяет достичь температуры, благоприятной для термофильных организмов, не прибегая к другим источникам тепла

Оптимизация объема аэробного термофильного реактора — трудная задача. Необходимо согласовать следующие взаимодействия, которые часто являются антагонистичными:

- увеличение объема реактора приводит к увеличению времени контакта, но при этом растут потери тепла за счет излучения и испарения,
- повышенная температура способствует ускорению кинетики реакции, но также препятствует повышению мощности аэрации из-за меньшей растворимости кислорода,
- большой расход энергии аэрации благотворно сказывается на процессе окисления, но вызывает более значительные потери тепла.

В умеренных климатических условиях при времени пребывания осадков в реакторе от 6 до 8 дней можно достичь температуры в реакторе около 50 °С, а также добиться удаления 40 % органических веществ в осадках с исходной концентрацией

сухих веществ 50 г/л (из которых органические вещества составляют 35 г/л) При работе с установками аэробного термофильного сбраживания необходимо принимать особые меры для контроля за пенообразованием и возможным выделением неприятных запахов

Осадки, которые выходят из аэробного термофильного реактора, работающего при 60 °С, содержат намного меньше бактерий, чем осадки, прошедшие обработку в анаэробной мезофильной установке В таких осадках яйца аскаридов практически не обнаруживаются, а сальмонеллы и вирусы обычно отсутствуют

Некоторые обрабатывающие установки работают от одной до двух дней по схеме аэробного термофильного сбраживания при 60 °С, а затем переходят в режим анаэробного мезофильного сбраживания, рассчитанного для 80 % органических веществ, содержащихся в исходных осадках Такое сочетание является целесообразным в том случае, если

- протекающие экзотермические реакции дают первому этапу возможность оставаться автотермичным (для этого требуется вводить достаточное количество кислорода в середину реактора),
- полученная на первом этапе температура обеспечивает обеззараживание осадков

На практике трудности технического поддержания условий азобиоза на первом этапе часто вызывают необходимость устанавливать дополнительные источники тепла При этом в режиме двухфазного термофильного/мезофильного сбраживания создаются условия для развития гидролитической и кислотообразующей флоры В любом случае размещаемая во второй части цикла установка анаэробного сбраживания должна включать в себя обычное оборудование для нагрева осадков (с установкой систем защиты и соблюдением периода запуска)

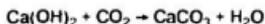
4.3. Химическая стабилизация. Известкование

Стабилизация осадков биологическим способом (анаэробным или аэробным) требует наличия сооружений больших размеров Если приоритетной задачей является уменьшение капитальных затрат, то можно снизить, хотя бы временно, способность к брожению за счет добавления химических реагентов, применяемых в **бактериостатических дозах** (после этого происходит значительное подавление активности патогенных организмов) Таким образом, этот способ не меняет количества биологически разлагаемых органических веществ, содержащихся в осадке В дальнейшем возможно возобновление ферментации, как только условия среды станут благоприятными Чаще всего используется известь благодаря дешевизне, щелочным свойствам и способности упрочнять физическую структуру осадка Известь можно вводить в жидкие или в обезвоженные осадки Эффект известкования в значительной степени определяется условиями применения

4.3.1. Известкование жидких осадков

- При обработке **жидких осадков** нужно рассматривать две возможные схемы
- введение извести до уплотнителя свежих осадков, чтобы блокировать процесс ферментации При этом $\text{Ca}(\text{OH})_2$ вводится в дозе приблизительно 10 % от взвешенных веществ осадка (минимизация ферментации в течение 1–2 дней),
 - стабилизация жидких осадков известью перед использованием биокультур; введение дозы $\text{Ca}(\text{OH})_2$ порядка 10 % от взвешенных веществ позволяет добиться (на небольших пробах и после тщательного перемешивания) значений pH, превышающих 12 (спустя 2 ч после введения) Подавление фекальных колиформ в этом

случае составляет от 10^4 до 10^6 . Но значение pH меняется очень быстро, поэтому, чтобы избежать возобновления ферментации до истечения двух недель, необходим ввод доз, превышающих 30 %. И даже в этом случае **хранение свежих известкованных осадков не может быть долгосрочным**, так как рекарбонизация гашеной извести $\text{Ca}(\text{OH})_2$ при контакте с CO_2 приводит к образованию карбоната кальция



Происходящее в результате постепенное снижение уровня pH, а также высокое содержание воды облегчают процесс возобновления ферментации, которую может остановить только новая доза извести

4.3.2. Известкование обезвоженных осадков

Стабилизация известкованием **обезвоженных осадков** обладает большей устойчивостью во времени, и эта устойчивость повышается со снижением содержания воды. Для перемешивания смеси извести с осадком, плотность которой велика, требуются аппараты перемешивания, обладающие большей мощностью. Поскольку реакция гидратации негашеной извести имеет экзотермический характер, то ее использование предпочтительно. Это благоприятно влияет на реакционную способность извести и на обеззараживающую способность (см. гл. 2, п. 6.3.3.1, обеззараживание осадков, нормативные акты EPA 40 CFR, раздел 503). При известковании возможно снижение количества микробов-маркеров до 10^6 , а также почти полное исчезновение бактерий сальмонеллы. Для того чтобы добиться обеззараживающего эффекта, а также блокирования ферментации на несколько месяцев, необходимо предусмотреть дозы CaO , превышающие 35 % от содержания сухих веществ в кеве.

Такой массивный ввод извести не проходит бесследно для последующей утилизации осадков в сельском хозяйстве. Эти осадки прекрасно подходят для кислых почв, однако на других типах почв они могут создавать определенные неудобства, а именно:

- более медленное развитие органических веществ в почве,
- комплексование элементов, входящих в состав удобрений, что снижает их эффективность,
- потери азота, вызванные выделением NH_3 (особенно для сброженных осадков).

Примечание. Возможен также и другой вариант — использование побочных продуктов, содержащих известь (мелкие фракции отходов цементной промышленности, пыль из печей для обжига известняка и др., например способ «N-Vig»)

5. Ленточные фильтр-прессы

5.1. Введение

Вот уже в течение 25 лет компания «Дегремон» разрабатывает собственные установки для уплотнения и обезвоживания осадков и предлагает сегодня полный ассортимент динамических уплотнителей (см. п. 2) и **ленточных фильтр-прессов**. Эта гамма продукции была разработана для обработки одновременно осадков гидрофильного типа, не приспособленных для работы под высоким давлением, и гидрофобных осадков, которые могут подвергаться воздействию большого давления, необходимого для получения высокого содержания сухих веществ. Механическая

конструкция установок приспособлена к применяемым натяжениям полотен (для создания давления)

Такие фильтры широко используются в силу следующих причин

- **большое удобство при эксплуатации** и хороший визуальный контроль за осадками во время их обезвоживания,
- умеренные эксплуатационные затраты и инвестиции,
- наличие встроенного устройства предварительного уплотнения, что позволяет обрабатывать **сильноразбавленные осадки**, взятые непосредственно из аэротенка,
- **непрерывный режим процесса** и промывки фильтрующих полотен,
- простота механического устройства,
- получение рыхлых осадков

Кроме того, метод обезвоживания в ленточных фильтр-прессах является практически универсальным (позволяет обрабатывать любые типы осадков) и **менее энергозатратным**, чем другие методы обезвоживания

- ленточный фильтр-пресс 10–25 кВт ч/т ВВ,
- классический фильтр-пресс 20–40 кВт ч/т ВВ,
- центрифуга 30–60 кВт ч/т ВВ

Однако получаемый кек имеет большую влажность (см табл 16)

5.2. Принцип фильтрации на ленточном фильтр-прессе

Процесс фильтрации всегда включает в себя следующие стадии

- **флокуляция полиэлектролитами** во флокуляторах с коротким временем пребывания, иногда процесс проходит прямо в трубопроводе,
- **дренаж** сфлокулированных осадков процеживание свободной межчастичной воды на фильтрующем столе, что вызывает быстрое сгущение осадков. Для достижения оптимальных результатов осадки на выходе из зоны процеживания должны иметь максимальную концентрацию,
- **прессование** процеженного осадка осадок оказывается между двумя фильтрующими полотнами, которые образуют угол и **постепенно** сжимают осадок. Такой «сэндвич» постепенно вовлекается в пространство вокруг перфорированного барабана, а затем направляется между расположенными в шахматном порядке валиками по траектории, которая может меняться в зависимости от типа фильтра

Эффективность обезвоживания зависит от **эффективного давления** P_e , которое воздействует на «сэндвич осадков», а также от времени прессования. Если выразить значение давления P_e (называемого поверхностным давлением) в упрощенной форме, то можно привести следующую формулу

$$P_e = k \frac{T}{LD}$$

где

- T — усилие натяжения полотна,
- L — ширина полотна,
- D — диаметр валика

Таким образом, давление P_e достигается за счет натяжения полотен вокруг валиков чем меньше диаметр валика, тем больше поверхностное давление P_e . Оно всегда остается умеренным (от 0,3 до 1 бар), поскольку механическая прочность ограничена фильтрующими полотнами и валиками

Время прессования зависит от активной поверхности прессуемого материала при намотке, а также от скорости продвижения.

Выделение воды облегчается благодаря явлениям **касательной деформации** осадка при прохождении валиков поочередно то с одной, то с другой стороны -ковра- (слоя) осадков

В ленточных фильтр-прессах **прессование происходит в открытом пространстве**, поэтому сам осадок обеспечивает боковую герметичность под воздействием давления, которое он испытывает во время процесса. Если давление становится слишком высоким, сцепление «ковра» разрушается, и тогда по боковым выходам происходит **процесс истечения** частично обезвоженных осадков

Давление, которое провоцирует такое истечение осадков, естественно, зависит от физической структуры процеженных осадков. Содержание сухих веществ в осадке, прошедшем ленточные прессы, оказывается меньше значений, получаемых на камерных фильтрах (фильтр-прессах), где прикладываемое давление ограничено только механической прочностью камер

Для повышения содержания сухих веществ существует два возможных решения

- увеличить число валиков и снизить их диаметр на конечной стадии фильтрации (в пределах механической прочности конструкции фильтра),
- использовать внешние компрессионные системы, независимые от натяжения полотен

Однако дополнительные устройства можно использовать только при обработке осадков с сильным сцеплением, например имеющих волокнистую структуру. Осадки коллоидного характера не выдержат дополнительного сжатия или в крайнем случае смогут лишь незначительно улучшить показатели по содержанию в них сухого вещества

Классические ленточные фильтр-прессы позволяют получать легко транспортируемые массы из большинства органических и гидроксидных осадков

5.3. Оборудование компании «Дегремон»

В стремлении предложить устройства, адаптированные для обработки широкого ряда осадков (органических, минеральных и т. д.), выдерживающих достаточные давления, компания «Дегремон» разработала два типа ленточных фильтров — **Superpress LP** и **Superpress HP**. Еще один вариант этих же фильтров, включающий в себя решетки предварительного уплотнения **GDE** и **GDD**, может использоваться на небольших очистных станциях. Это упрощенный вариант фильтров **GDPress**

5.3.1. Фильтры *Superpress LP* и *Superpress HP*

В зависимости от поставленной задачи и от качества осадков, подлежащих обезвоживанию, предлагаются различные варианты фильтров

5.3.1.1. Фильтр *Superpress LP*

Этот вариант аппарата подходит для обезвоживания осадков сточных вод городов и предприятий агропромышленности, которые обычно не выдерживают высоких давлений. На рис. 20 представлена принципиальная схема фильтра **Superpress** (базовый вариант) без решеток **GDE** и **GDD**.

Осадок вместе с флокулянтom вводится в **смеситель** (а), оснащенный мешалкой с регулируемой скоростью. Флокулированный осадок выливается на ленту полотна в **зону процеживания** (б). Осадок равномерно распределяется по всей ширине фильтра

В зоне процеживания слой осадка проходит **боронование**, а затем распределяется в виде равномерного и однородного слоя на валике (с), который называется **дренажным валиком**. Этот валик позволяет



Рис. 20. Принципиальная схема ленточного фильтра типа *Superpress*

- ввести в зону прессования однородный слой осадка (толщина может варьироваться от 10 до 40 мм в зависимости от положения, предварительно отрегулированного оператором).
- обеспечить **первичное уплотнение** осадка, чтобы ограничить вытекание осадка при прессовании

Затем осадок оказывается между нижней (d) и верхней (e) лентами полотна, где он подвергается первому умеренному прессованию вокруг **перфорированного барабана** большого диаметра (f). Затем две постоянно движущиеся ленты проходят на **обратные валки** (g) с уменьшающимися диаметрами, при этом давление на осадок **постоянно увеличивается**. Количество витков выбирается таким образом, чтобы обезвоживание было почти завершено до поступления на последний валик.

На выходе две ленты разъединяются, и после прохождения приводного валика (h) кек извлекается двумя скребками и удаляется с помощью ленточного транспортера, насоса или шнека.

Автоматическая центровка каждого полотна обеспечивается с помощью валика с угловым смещением. Два полотна с крупными порами постоянно промываются в закрытых камерах (i) с помощью рампы, которые пульверизируют воду под давлением (4–6 бар).

Простые регулировочные процедуры позволяют приспособить работу фильтра к характеристикам осадка:

- натяжение лент (давление фильтрации) регулируется с помощью пневматических домкратов с регулируемым давлением;
- скорость привода лент изменяется от 1 до 5 м/мин;
- энергия флокуляции настраивается регулировкой скорости мешалки флокулятора;
- оптимальная высота слоя («ковра») осадков устанавливается в начале прессования.

Шасси фильтра *Superpress* спроектированы таким образом, чтобы обеспечить:

- хороший визуальный контроль дренажной зоны,
- легкий доступ к механическим частям;

- ширину лент от 1 до 3 м
- К таким фильтрам имеется следующее дополнительное оборудование (на заказ)
 - решетки уплотнения **GDE** и **GDD**, встроенные в дренажную зону (см п 5 3 1 2),
 - вывод предварительно процеженных осадков на двойную решетку **GDE/GDD** фильтра **Superpress LP**,
 - шесть дополнительных валиков сжатия;
 - самоочищающиеся рампы для промывки полотна;
 - комплект вспомогательных датчиков для помощи в эксплуатации,
 - встроенный укрывающий кожух (см. фото 9 и 10)

5.3.1.2. Фильтр **Superpress HP**

Этот вариант отличается от предыдущего более высоким давлением на осадок. Конструкция механизма приспособлена для такого решения (прежде всего, укрепленное шасси). Этот вариант также позволяет обрабатывать агрессивные осадки (аппарат прошел усиленную антикоррозионную обработку).

5.3.1.3. Решетки **GDE** или **GDD** + фильтр **Superpress**

Интегрирование решеток **GDD** или **GDE** (см п. 2 2 2 1) в фильтр **Superpress** (рис. 21) обеспечивает повышенное содержание сухих веществ на входе в зону обезвоживания независимо от степени разбавления осадка (> 2 г СВ/л). Это позволяет значительно повысить объемную производительность установки, не снижая при этом массовый расход.

В табл. 14 показаны преимущества дополнительного предварительного процеживания осадков на уплотнительных решетках **GDE** или **GDD** в начале дренажной зоны фильтра **Superpress**.

Таблица 14
Параметры расчета фильтра **Superpress с предварительным дренажом и без него**

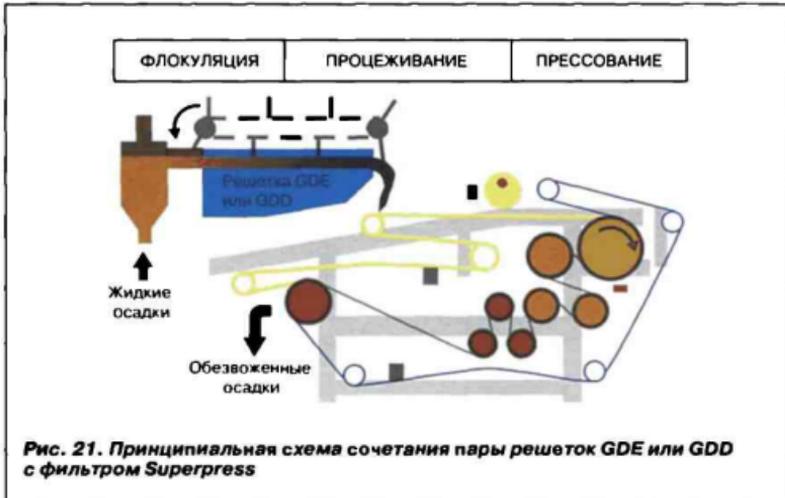
Параметр	Без предварительного дренажа	Предварительный дренаж на решетке GDE	Предварительный дренаж на решетке GDD
Минимальная концентрация поступающих осадков г ВВ/л	20	8-20	2-8
Объемный расход м ³ /(ч·м)	6-8 для осадков ГСВ до 11 для осадков целлюлозной промышленности	10-20 для осадков ГСВ до 25 для осадков целлюлозной промышленности	25-40 для осадков ГСВ или аграрной/пищевой промышленности

Комбинированные аппараты **GDD** или **GDE/Superpress** имеют ряд других преимуществ.

- **GDE/Superpress**: осадки отбираются прямо из рециркуляционного потока активных илов. Это позволяет обойтись без установки бункерных концентраторов и обрабатывать неферментированные осадки, что приводит к лучшим показателям по содержанию сухих веществ.
- **GDD/Superpress**: позволяет увеличить надежность функционирования всего комплекса обезвоживания, так как, отбирая осадки прямо из аэрационного резервуара, удается избежать риска анаэробноз (отсутствует вымывание фосфо-

ра) Кроме того, удастся обеспечить постоянную концентрацию поступающего материала и стабильность флокуляции осадка (возможна работа аппарата без наблюдения и оптимизация расхода реагентов).

— оба аппарата позволяют при необходимости вывести осадки из обработки прямо на выходе с предварительного дренажа (например, для периодического вывоза сгущенных осадков на поля)



■ Модели фильтров Superpress

Таблица 15
Модели фильтров Superpress

	Ленты, м	Встроенная решетка GDE, м	Встроенная решетка GDD, м	Валики (ролики) прессования	Наименование
LP	1,5, 2 и 3	2,5, 3 и 4	2,5, 3 и 4	6 или 12	(GDE или GDD) LP 15, LP 20, LP 30
HP	1, 2 и 2,5	1, 2 и 2,5	-	6 или 12	(GDE или GDD) HP 10, HP 20, HP 25

5.3.1.4. Показатели работы фильтров Superpress

В табл. 16 приведены примерные параметры работы различных моделей фильтров этого типа для разных осадков

Таблица 16
Показатели работы фильтров Superpress на различных видах осадков

Тип осадков	Происхождение осадков	Концентрация г ВВ / л	Superpress	Объемный расход м ³ /ч на 1 м ленты	Концентрация лека по СВ %
Органические гидрофильные	ГСВ, продленная аэрация ¹ без предварительного отстаивания	2-8 8-20 20-25 >20	GDD/LP GDE/LP GDE/LP LP	35-60 15-30 10-15 6-8	15-20
	ГСВ смешанные свежее ²	40-50	LP	6-8	22-27
	ГСВ сброженные ²	20-25	LP GDE/LP	7-8 10-18	20-27
		30-40	LP GDE/LP	6-7 8-10	20-27
	ГСВ после физико-химической обработки в установках Densafleg/Вилокс	30-40	LP	6-8	24-28
Биологические осадки молочной промышленности	15 до 20 2 до 5	LP GDD/LP	5-6 30-45	12-14	
Минеральные гидрофобные	Осадки декарбонатации ³	> 300	HP	3-0-4-5	50-70
Волокнистые	Осадки целлюлозной промышленности ⁴	25-90 20-40	HP GDE/HP	3-5-11,0 10-25	25-50

¹ Характеристики осадков с продленной аэрацией могут варьироваться (концентрация относительно ЛВ-ВВ) в зависимости от того, поступает ли на очистную станцию сточные воды из сельскохозяйственного сектора, а также в зависимости от наличия в аэротенке одновременно протекающего процесса утилизации фосфора.

² Показатели варьируются в зависимости от количества летучих веществ в осадках, а также от соотношения первичных осадков / биологические осадки.

³ Показатели изменяются в зависимости от концентрации осадков и от содержания в осадках карбоната кальция CaCO₃.

⁴ Показатели изменяются в зависимости от концентрации осадков, количества волокон, а также от наличия биологических осадков.



Фото 9. Установка GDD/Superpress в г. Ган (Верхние Альпы, Франция)



Фото 10. Установка GDE/Superpress в г. Ревеле (Верхняя Гарона, Франция)

5.3.2. Ленточный фильтр-пресс для небольших очистных сооружений GDEPress

Этот компактный аппарат включает в себя модуль уплотнения (решетку GDE или GDD) и упрощенный модуль прессования (рис. 22), который имеет один барабан

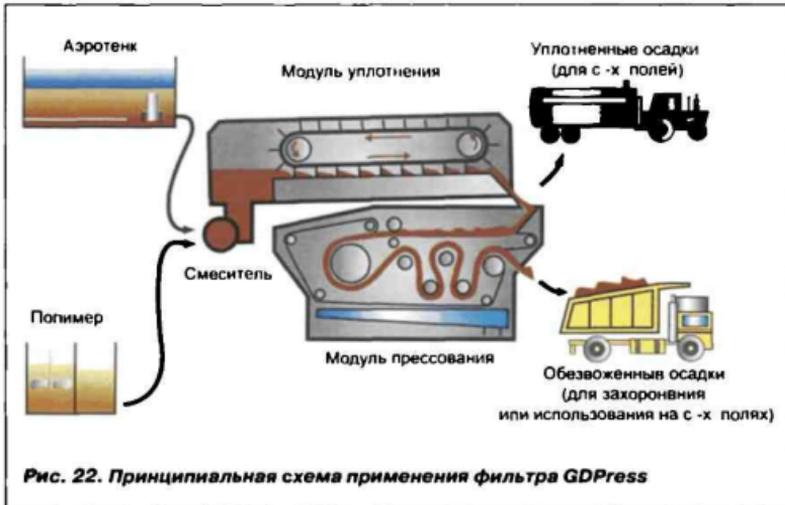


Таблица 17**Характеристики аппаратов GDPress и показатели их работы с осадками от сооружений продленной аэрации**

Показатель	Модель GDPress 908D	Модель GDPress 908E	Модель GDPress 912D	Модель GDPress 912E
Ширина решетки и полотна мм	800	800	1200	1200
Концентрация сухих веществ в исходных осадках г/л	2-8	> 8	2-8	> 8
Объемная производительность на входе м ³ /ч	10-35	6-15	15-50	9-22
Массовая производительность по сухому веществу на входе кг/ч	90-120	90-120	140-180	140-180
Концентрация коки по сухому веществу %	14-17	14-17	14-17	14-17

только пять валиков. Эти аппараты (табл. 17), имеющие прочную конструкцию, полностью выполнены из нержавеющей стали и просты в эксплуатации и обслуживании. В частности, как и на всех аппаратах типа **Superpress**, можно запрограммировать остановку машины (или включить устройство дистанционно) без визуального контроля.

Осадки для обработки могут подаваться на модели 908D и 912D непосредственно из аэротенков, что делает ненужным накопитель или сгуститель.

6. Центрифугирование

Основные принципы разделения суспензий на твердую и жидкую фазы с помощью центрифугирования описаны в гл. 3, п. 6.

При обработке осадков используются установки, которые представляют собой непрерывно действующие горизонтальные осадительные центрифуги с цельным цилиндроконическим ротором.

6.1. Способность осадков к разделению при центрифугировании

Если поместить пробу свежих смешанных осадков городских сточных вод массой 200 г на несколько минут в лабораторную центрифугу, то в центрифугационной пробирке увидим следующие компоненты (рис. 23):

- мутная жидкость на поверхности;
- донный осадок, состоящий из двух основных зон
 - нижняя зона достаточно плотного осадка (содержание сухих веществ 23–35 %);
 - верхняя зона пастообразного осадка (содержание сухих веществ 10–15 %) с высоким содержанием органических веществ.

Если мы повторим этот опыт на осадках, сфлуктурированных с помощью полиэлектролита, то получим:

- светлую жидкость на поверхности,
- гомогенный осадок со средними значениями сухого вещества (18–22 %) с высокой когезией.

Такая способность суспензии осадков к разделению на две фазы в процессе центрифугирования (т.е. без использования фильтрующего устройства, например ленточного фильтра или фильтр-пресса) называется **центрифугируемостью осадков**.

Для того чтобы добиться хорошего разделения жидкой и твердой фаз, необходимо провести кондиционирование осадка с помощью полимера

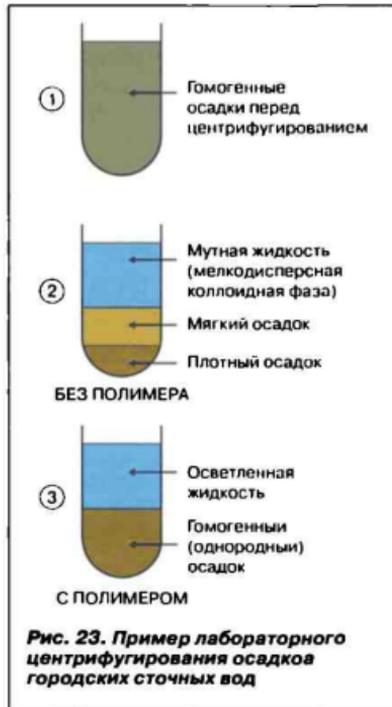
6.2. Непрерывно работающая цилиндроконическая осадительная центрифуга

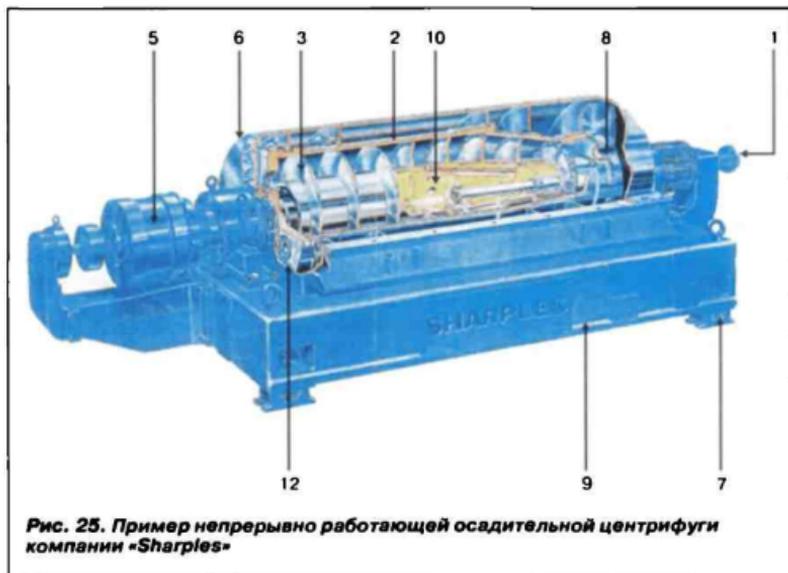
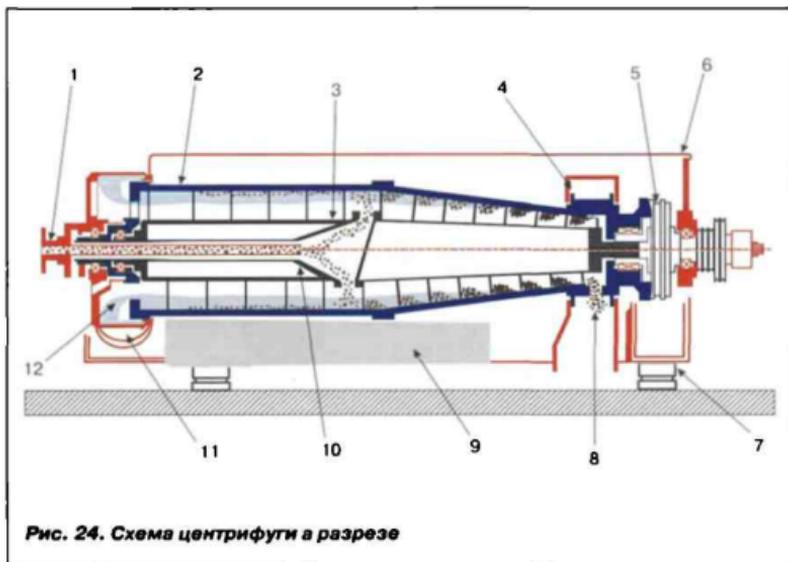
На рис. 24 представлена принципиальная схема, а на рис. 25 показано внутреннее устройство центрифуги. Суспензия, которая подлежит обработке, вводится внутрь машины с помощью неподвижного патрубка (1), который выходит на вращающийся распределитель (10). Этот распределитель размещает осадок по окружности и проталкивает суспензию в кольцеобразное пространство между ротором (2) и шнеком (3). Под воздействием центробежной силы твердые частицы оседают и скапливаются прямо на внутренней поверхности ротора. Они захватываются транспортирующим шнеком и непрерывным потоком направляются в коническую часть ротора. Благодаря редуктору (5) шнек вращается со скоростью, немного превышающей скорость вращения ротора (дифференциальной скоростью). Обезвоженные в конической части осадки отводятся по соплам (8), равномерно распределенным по всей окружности вокруг оконечности конуса, и накапливаются в осадочном картере (4).

Непрерывная подача осадка на входе обеспечивает поток жидкости в зоне осветления, которая отводится в виде фугата в сборник (11) через регулируемый слив (12). Таким образом, жидкость внутри центрифуги распределяется вдоль цилиндрической поверхности (внутренней поверхности жидкого кольца).

Комплекс аппарата устанавливается на сбалансированном постаменте (9), который размещается на полу с использованием мощных буферов-амортизаторов (7).
Закрытый кожух (6) обеспечивает защиту от вращающегося с большой скоростью ротора центрифуги.

В большинстве случаев в качестве материала конструкции применяется нержавеющая сталь марки 304, 316L или типа «Дуплекс» (-Duplex-)





6.3. Основные геометрические параметры

Центрифуги (рис. 26) оцениваются по четырем основным критериям

- объемная гидравлическая производительность, т. е. количество осадков в $\text{м}^3/\text{ч}$, которое центрифуга может принять,
- массовая производительность, кг ВВ/ч (произведение гидравлической производительности и концентрации поступающих осадков),
- содержание сухих веществ в полученном осадке (кеке),
- степень разделения или эффективность задержания количество ВВ в осадке (кеке) по отношению к общему количеству ВВ перед обработкой

6.3.1. Диаметр ротора D и отношение L_T/D

Аппараты для обработки осадков характеризуются диаметром ротора, который может варьироваться от 0,25 до 1,10 м. Обрабатываемый объем осадка растет прямо пропорционально увеличению диаметра и соотношения L_T/D . В первом приближении можно констатировать следующее

- при одинаковом значении L_T/D коэффициент экстраполяции при расчете производительностей близок к отношению D_1^3/D_2^3 для двух установок с диаметрами роторов соответственно D_1 и D_2 ,
- при одинаковом диаметре и при изменении отношения L_T/D с 4 до 5 массовая производительность возрастает на 30–50 % в зависимости от качества обрабатываемого осадка.

6.3.2. Угол конусности

Для большинства установок этот угол обычно составляет от 8 до 12°. Меньшие значения угла (6–7°) могут использоваться для извлечения особо трудных осадков (клеякие осадки с тиксотропной структурой).

Большие углы (20°) применяются для извлечения осадков с твердой и компактной структурой. В этом случае удается добиться больших объемов внутреннего накопления кека, что приводит к повышению массовой производительности



- N — скорость вращения ротора
- D — диаметр цилиндрической части ротора
- d — диаметр конуса на выходе кека
- L_T — общая длина
- L_C — длина цилиндрической части ротора (называемая зоной осветления)
- α — угол конусности
- l — длина конической части ротора
- H — высота витка между шнеком и ротором
- p — шаг шнека
- H_A — глубина жидкого кольца
- H_M — глубина кольца при переполнении
- D_A — внутренний диаметр жидкого кольца

6.3.3. Высота витка H между шнеком и ротором

Большое пространство позволяет увеличить время пребывания осадка в машине и, следовательно, продлить время воздействия центробежной силы

6.3.4. Расстояние между шнеком и ротором в конической части

Чем меньше это расстояние, тем больше степень сжатия осадка. Это один из ключевых параметров в эволюции конструкции центрифуг, увеличение которого позволяет повысить содержание сухих веществ и таким образом подтверждает репутацию центрифуг высокого давления как самых результативных устройств среди множества других конструкций

6.3.5. Площадь поверхности осветления S с максимальным кольцом жидкости

Этот важный параметр определяет максимальную поверхность осветления

$$S = \pi \cdot D_A \cdot L_C \cdot m^2$$

Производительность машины Q будет повышаться с увеличением этой поверхности

6.3.6. Внутренний объем ротора

Соотношение внутренних объемов ротора также позволяет оценить по экстраполяционному методу производительность установок, исходя из соотношения ускоренней F_{C1}/F_{C2} . Если принять

$$K_v = \frac{V_1}{V_2} \text{ и } K_u = \frac{F_{C1}}{F_{C2}},$$

тогда коэффициент экстраполяции производительностей $K = \frac{K_v}{K_u}$

6.3.7. Противоточная и прямоточная системы

На рис. 27 представлены эти два принципа работы. Применение **прямоточной системы** (питание поступает в головной отсек цилиндрической части) остается целесообразным для некоторых случаев уплотнения без использования полимеров или для особо трудных осадков (например, для слишком пластичных осадков). Этот метод характеризуется низкими значениями содержания сухих веществ в кеке, но высоким качеством осветления.

Противоточная система позволяет добиться более высоких значений содержания сухого вещества в кеке, а также повысить массовую производительность, поэтому такая система сейчас применяется чаще всего.

Кроме того, существуют и многофункциональные роторы

6.3.8. Параметр Σ

Этот параметр дает поверхность простого отстаивания, которая эквивалентна поверхности центрифуги, работающей при ускорении 1000 g. Каждый изготовитель по-своему рассчитывает параметр Σ , поэтому сравнивать такие значения нужно осторожно.

Параметр Σ можно рассчитать с помощью следующей приближенной формулы (рис. 28).

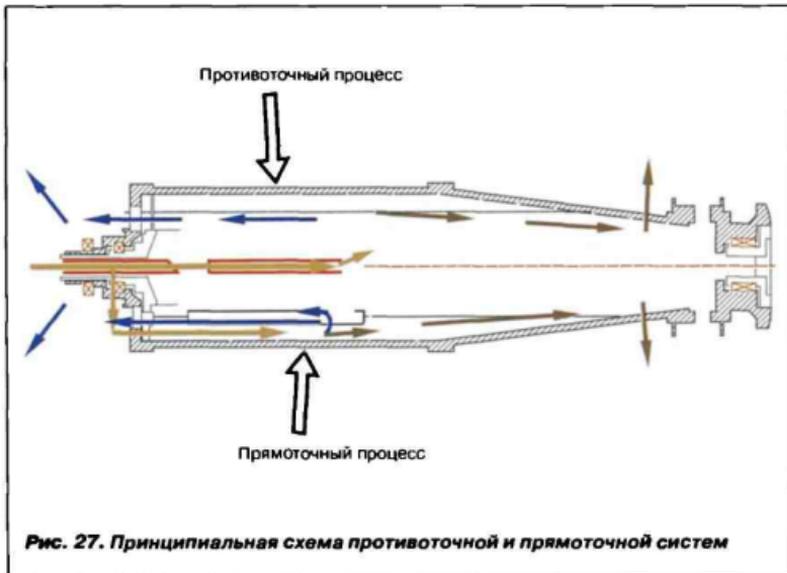


Рис. 27. Принципиальная схема противоточной и прямоточной систем

$$\Sigma = \frac{2\pi n^2 L_1}{g} (3/4 R^2 + 1/4 r^2) \text{ при } R \text{ и } r, \text{ измеренных в метрах}$$

Для сравнения различных машин параметр Σ рассчитывается при номинальной скорости вращения функционирования N (производящей ускорение 1000 g)

Σ_n может также использоваться при экстраполяции объемной производительности установок различных типов. Тем не менее приводимую ниже формулу нужно использовать с осторожностью

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{N_2^2}{N_1^2}$$

6.3.9. Шнек для выгрузки кека

Высота витков шнека, а также размер шага шнека оказывают большое влияние на объемную производительность машин. Шнек извлечения осадка — это механизм, очень чувствительный к абразивному трению. Витки шнека защищены напылением из карбида вольфрама или накладками из закаленного карбида вольфрама.



Рис. 28. Определение параметра Σ

Конструкции каждого изготовителя имеют свои особенности в некоторых используются прорезные (ажурные) витки в конической части для того, чтобы обеспечить более быструю и сложную передачу жидкости, в других аппаратах в конической части ничего не меняют, чтобы повысить степень сжатия, иногда применяется введение осадков либо в цилиндрическую часть, либо в место перехода от конической к цилиндрической части и т. д.

6.4. Центрифуга высокого давления

В настоящее время чаще всего при обработке осадков применяют именно такие установки (рис. 29). Основное преимущество этих аппаратов заключается в **резком увеличении содержания сухого вещества в кеке**. По технологическим показателям они занимают промежуточное место между ленточными фильтрами и фильтр-прессами.

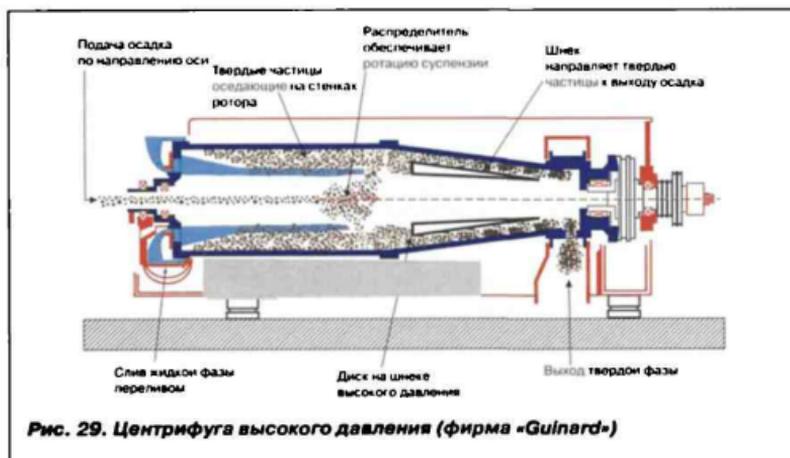


Рис. 29. Центрифуга высокого давления (фирма «Gulnard»)

6.4.1. Параметры, позволяющие увеличить содержание сухих веществ в кеке

Увеличение центробежной силы в настоящее время используется ускорение до 3000 g (и даже до 3500 g), при этом необходимо предусматривать увеличение прочности роликов подшипников.

Увеличение внутреннего объема ротора большой объем кека может дольше задерживаться в машине, что значительно увеличивает время центрифугирования (до 5–10 мин).

Работа с очень высоким значением вращающего момента: вращающий момент выражает фрикционные усилия на шнек и зависит от степени заполнения машины, а также от ограничений, связанных с растиранием осадка. Высокое значение вращающего момента говорит о максимуме накопления осадка, особенно в переходной зоне (сравните рис. 29 с рис. 24, на котором представлена традиционная

центрифуга низкого давления) Работа с высоким значением вращающего момента требует установки более мощных редукторов, а также вызывает необходимость регулировки дифференциальной скорости V_d шнека в зависимости от величины момента, чтобы избежать забивания машины и обеспечить постоянство значений содержания сухого вещества в выгружаемом осадке

Глубокое жидкое кольцо (следовательно, высокое гидравлическое радиальное давление) уровень кольца регулируется в соответствии с качеством осадка, а внутренний диаметр жидкого кольца меньше выходного диаметра конуса машины (на рис. 30 представлена центрифуга высокого давления при включении, в которой фугат выходит из машины вместе с осадком) И напротив, во время стабильной работы (через 2–3 мин после начала работы с осадком) в конической части образуется пробка из получаемого осадка, которая не дает жидкости выходить вместе с кеком (см рис 29)

Высокий уровень компрессии в конической части шнека некоторые изготовители даже устанавливают заградительный диск в начале конической части (см рис 29) При этом ставится двойная задача.

- заставить осадки пройти в ограниченное калиброванное пространство, что, естественно, увеличивает касательное напряжение и приводит к освобождению максимума воды,

- размельчить выгружаемый осадок, чтобы способствовать отделению воды

Более высокие дозировки полимеров роста концентрации сухого вещества можно добиться только с помощью передозировок полимера, увеличив его содержание приблизительно на 70–100 %, чем при работе на ленточных фильтрах или фильтр-прессах, а также по сравнению со старыми центрифугами низкого давления

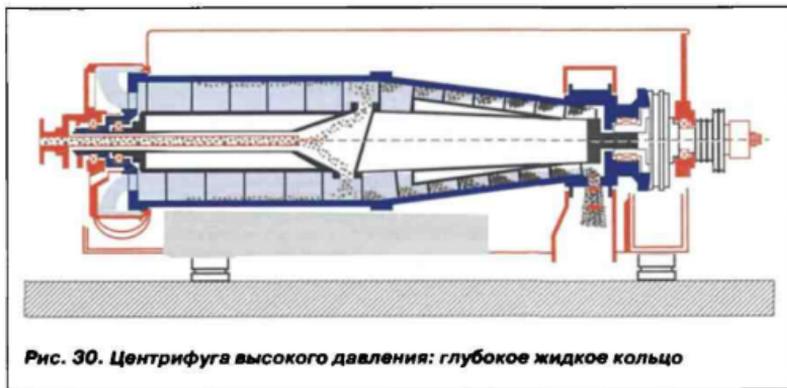


Рис. 30. Центрифуга высокого давления: глубокое жидкое кольцо

6.4.2. Рабочие переменные параметры

Скорость ротора V_d : целесообразно работать на скорости, составляющей 80–90 % от максимальной скорости машины.

Дифференциальная скорость V_d : определяется заданной величиной вращающего момента Регулируя скорость транспортировки, нужно добиться постоянной величины вращающего момента Если вращающий момент имеет тенденцию к росту, то, чтобы не допустить забивания машины, следует увеличить скорость V_d . И наоборот, при падении вращающего момента дифференциальная скорость соответ-

ственно также должна снижаться. Обычно используются значения скорости V_d в диапазоне 1–5 об/мин.

Глубина жидкого кольца регулируется с помощью сливных желобов на уровне отверстий отвода фугата. Некоторые изготовители предлагают системы регулировки уровня жидкости, которые могут функционировать при работающей машине.

Расход осадка: снижая номинальную производительность машины, можно увеличить содержание сухих веществ в кеке.

Выбор полимера для многих осадков можно добиться более высоких значений концентрации сухих веществ в получаемых осадках (1 или 2 пункта) с помощью полимеров, введенных в форме эмульсии.

Расход полимера это значение можно очень точно регулировать с помощью измерения массового потока на входе в центрифугу (при выборе эффективного измерительного датчика концентрации осадков).

Расход полимера также может регулироваться по мутности фугата, однако обеспечить стабильность процесса регулирования очень трудно (наличие пены, флокулированных взвешенных веществ и т. п.)

Температура осадков можно увеличить содержание сухих веществ в кеке на 1–3 пункта при нагреве осадков до 60–65 °С. Необходимо отметить, что при этих температурах получаемый фугат включает в себя больше загрязняющих углеродсодержащих растворенных веществ.

6.4.3. Технологические параметры

Тесты на качество флокуляции (с сильным сдвигом) позволяют выявить те полимеры, которые образуют более устойчивые хлопья. **Тесты на центрифугируемость** (см. гл. 5, п. 6.10) помогают оценить содержание сухих веществ и объем выгружаемого осадка, что позволяет приблизительно определить приемлемую массовую производительность.

Наилучшим способом оценки работы центрифуги остается формула расчета эффекта задержания, или степени извлечения T_C , %

$$T_C = \left[1 - \frac{C_L(C_S - C_A)}{C_A(C_S - C_L)} \right] 100,$$

где

C_L — концентрация осветленной жидкости или фугата (по ВВ), %;

C_S — содержание сухих веществ в выгружаемом осадке, % СВ;

C_A — концентрация (по ВВ) осадков на входе в аппарат с учетом введения полимера и разбавления, %

Для большинства осадков эффект задержания ВВ должен превышать 95 % (и даже 97–98 % для концентрированных осадков, т. е. более 50 г/л), что соответствует концентрации фугата от 0,5 до 1,5 г ВВ/л.

Эффект задержания может быть рассчитан также по следующей формуле

$$T_C = \frac{Q_S}{Q_A} 100,$$

где

Q_A — массовый расход суспензии на входе в аппарат,

Q_S — массовый расход выгружаемого осадка.

Однако последний способ требует измерения расхода поступающих осадков, а также взвешивания кека, выгружаемого из машины, что достаточно сложно осуществить на практике.

Таблица 18

Диаметр ротора, мм	Производительность, м ³ /ч
250	1-6
300-350 (стандартный)	6-12
300-350 (удлиненная модель)	8-18
400-450 (стандартный)	8-25
400-450 (удлиненная модель)	10-30
500-550 (стандартный)	12-35
500-550 (удлиненная модель)	20-60
700-750 (стандартный)	30-100
700-750 (удлиненная модель)	40-140
900-1000	50-200
1100	70-250

Как уже было показано, объемная производительность установок зависит от диаметра ротора, а также от длины цилиндрической части (табл. 18).

Объемная производительность зависит также от концентрации и от качества осадков, поступающих в центрифугу, этим объясняется большой разброс представленных значений (см. табл. 18).

При обработке осадков городских сточных вод наиболее характерными являются технологические показатели, представленные в табл. 19

Таблица 19

Технологические показатели центрифуг при обработке осадков городских сточных вод

Тип городского осадка	Доза полимера, кг АВ/т СВ	Концентрация кека по сухому веществу, %
Осадки продленной азрации с одновременной дефосфатацией	9-11	20-22
Осадки продленной азрации с третичными осадками	10-12	19-20
Осадки продленной азрации со сбраживанием	9-11	20-22
Первичные физико-химические осадки	6-7	29-34
Первичные физико-химические осадки + осадки от фильтра Biofor (15-35 %)	7-8	28-32
Свежие смешанные осадки (Р/Вю ¹ = 50/50)	8-9	25-27
Свежие смешанные осадки (Р/Вю = 65/35)	7-9	26-29
Смешанные сброженные осадки (Р/Вю = 50/50)	8-9	25-28
Сброженные первичные осадки	4-6	32-36

¹ Р/Вю — массовое соотношение первичных и биологических осадков

6.4.4. Пример прямого центрифугирования

Уплотнение и обезвоживание возможно проводить **за один этап**, т.е. осуществить обезвоживание разбавленных осадков. В основном это решение применяется для обработки осадков от продленной азрации, но такое обезвоживание можно проводить и для осадков с концентрацией 10–15 г/л, например для осадков, выходящих из статического тонкослойного отстойника, или для смеси осадков (первичных уплотненных осадков и неуплотненных биологических осадков). Главное преимущество этого способа — малые затраты на проведение уплотнения (частично компенсируемые большим размером центрифуги), а также экономия на полимерах, необходимых для работы на некоторых аппаратах динамического сгущения.

Однако должно быть соблюдено главное условие — **обеспечить относительно стабильную концентрацию** (± 1 г/л) на входе в установку, что предполагает в большинстве случаев размещение в технологической линии бака усреднения (гомогенизации) перед аппаратами обезвоживания. Действительно, при отборе биологических осадков из рециркуляционного приемка вторичного отстойника концентрации осадков могут варьироваться в диапазоне 6–15 г/л в зависимости от гидравлического режима работы очистных сооружений, что может привести к сбоям при эксплуатации. На больших очистных сооружениях концентрации отбираемых осадков более стабильны, поэтому такой смесительный резервуар можно не устанавливать, а вместо усреднения регулировать массовый поток на входе в центрифугу.

Значения содержания сухих веществ в кеке имеют тот же порядок, что и при классическом обезвоживании предварительно уплотненных осадков (например, около 20 % для осадков с продленной азрацией). Однако если необходимо сохранить высокий эффект задержания, несмотря на низкую концентрацию осадков, поступающих в аппарат, то придется работать с необычными концентрациями фугата (с концентрацией взвешенных веществ 0,2–0,3 г/л). Поэтому дозы полимеров (настоятельно рекомендуем использовать эмульсии) будут немного повышены (11–12 кг активного вещества на 1 т сухих веществ для осадков от длительной азрации).

При прямом центрифугировании определение параметров центрифуги производится по максимальной гидравлической (объемной) производительности, так как массовая производительность не является в данном случае ограничивающим фактором (например, для осадков от продленной азрации с концентрацией взвешенных веществ 7–9 г/л осадительная центрифуга диаметром 500–550 мм, удлиненная модель, может принимать до 55–63 м³/ч).

Энергопотребление в расчете на количество тонн обезвоженного осадка остается достаточно высоким, поскольку установки не вырабатывают свой максимальный потенциал по массовой производительности. В зависимости от концентрации на входе в установку расход энергии будет составлять от 120 до 200 кВт ч/т ВВ, а при обработке предварительно уплотненных осадков — от 60 до 80 кВт ч/т ВВ.

6.5. Реализация

Предварительная обработка. В настоящее время уже нет необходимости (кроме редких исключений для некоторых промышленных осадков) пропускать осадки через решетки/сита или очищать их от песка для защиты центрифуг. Современные решетки, устанавливаемые в начале очистных сооружений (часто их размер — от 3 до 10 мм), а также эффективные песколовки (они удаляют из исходной воды от 90 до 95 % песок, размер которых превышает 200 мкм) представляют собой достаточно надежные устройства. Для большинства городских осадков срок службы шнеков составляет от 15 000 ч за счет технического усовершенствования антиабразивного покрытия.

Подача. Чтобы добиться постоянного значения эффекта задержания, необходимо обеспечить постоянную подачу осадков на входе в машину (с помощью объемного насоса с эксцентриковым или лопастным ротором)

Защита от шума. Уровень громкости звука установки при нормальном режиме работы составляет 85–90 дБ (А). Это означает, что при таких значениях шума оператор или технический специалист не сможет долго находиться рядом с установкой. Таким образом, необходимо обеспечить звукоизоляцию цеха и снабдить персонал защитными касками либо установить капот на установку, чтобы снизить уровень шума на десятки децибелов

Эффекты вибрации. Любая вращающаяся машина вызывает вибрации, которые невелики при установившемся режиме работы, но могут оказаться высокими во время переходных состояний (при запуске, остановке). Таким образом, аппарат должен быть изолирован следующим образом: эластичные уплотнения (соединения) должны устанавливаться на входе машины, на выходе фугата, на выгрузном бункере кека, а также необходимо установить амортизаторы под станину машины. При установившемся режиме работы нормальными считаются вибрации порядка 5 мм/с. Вибрации не должны превышать 15–20 мм/с, поскольку в противном случае возможны серьезные повреждения машины

Отвод жидкостей при включении и выключении (см. рис. 30). Так как диаметр жидкого кольца обычно меньше выходного диаметра конической части ротора (для центрифуг высокого давления), то при включении машины и при ее остановке для промывки не удастся избежать вытекания жидкостей. Чтобы направить жидкость в общий трубопровод фугата, на выходе кека необходимо установить быстродействующий затвор. Этот затвор должен приводиться в действие автоматически в зависимости от значения вращающего момента

Более простое решение заключается в установке наклонного шнека, открытого в нижней точке и расположенного прямо под бункером выгружаемого осадка (рис. 31)

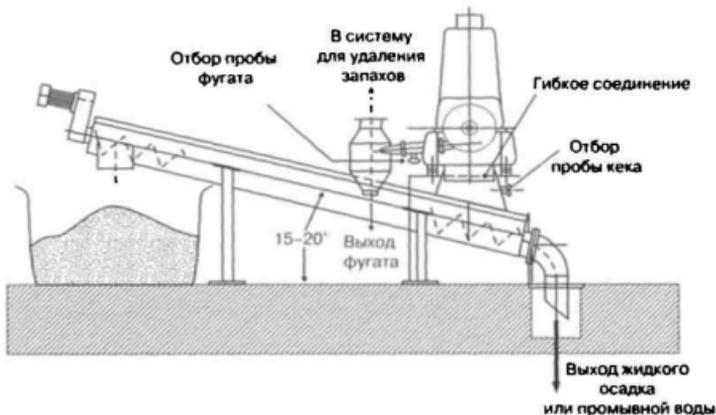


Рис. 31. Выход кека с использованием наклонного шнека

Потребление энергии. В табл. 20 представлены средние значения энергопотребления для предварительно сгущенных осадков

Таблица 20

Осадки от сооружений продленной аэрации	60–80 кВт ч/т ВВ
Первичные физико-химические осадки	35–50 кВт ч/т ВВ
Свежие смешанные или сброженные осадки	50–65 кВт ч/т ВВ

Улавливание неприятных запахов. На бункере выхода фугата необходимо установить газоприемник, который следует присоединить к системе удаления запахов очистных сооружений. Отсек выгрузки осадков должен быть закрыт. Таким образом, цех центрифугирования будет требовать лишь небольшой вентиляции по сравнению с другими цехами обезвоживания.

Техническое обслуживание должно производиться квалифицированным персоналом. После проведения любых работ на шнеке или роторе необходимо повторно регулировать механизм для восстановления балансировки.

Эксплуатация. При работе машины осадки не видны, поэтому нужно адекватно реагировать на плохие результаты работы (табл. 21). Необходимо добиться выполнения основных задач:

- получения осветленного фугата,
- достижения приемлемых значений содержания сухих веществ в кеке без передозировок полимера.

Таблица 21

Неисправность	Действия для исправления (необходимо придерживаться порядка, указанного ниже)
Слишком высокая загрязненность фугата	Снизить значение крутящего момента (T и увеличить дифференциальную скорость V_R), или увеличить дозу полимера, или снизить расход осадка, или увеличить диаметр жидкого кольца.
Слишком низкие значения содержания сухих веществ в кеке	Повысить значение момента (T и снизить V_R), или увеличить дозу полимера (или сменить полимер), или увеличить скорость вращения ротора, или снизить расход осадка, или уменьшить диаметр жидкого кольца.

6.6. Преимущества и недостатки центрифугирования

Известно, что в течение последних десяти лет центрифугирование стало применяться для обезвоживания осадков. Это вызвано прежде всего его преимуществами.

- обезвоживание проходит в непрерывном режиме в закрытом пространстве, что сокращает выброс неприятных запахов и, следовательно, снижает расходы на вентиляцию помещений.
 - при правильном проектировании (с автоматической промывкой) компактная установка не вызывает загрязнений в цехе.
 - центрифуга может работать без дополнительного контроля при условии стабильности поступающих осадков, все механические предохранительные устройства входят в стандартную установку, а благодаря новым датчикам концентрации осадков автоматическая работа установки стала достаточно надежной.
 - значительное увеличение сухих веществ в кеке, а для некоторых видов осадков эта величина приближается к показателям фильтр-пресса (что на 4–6 пунктов выше результатов старых центрифуг низкого давления); в табл. 22 показатели концентрации кека и значения по расходу полимера сравниваются с результатами, получаемыми на ленточных фильтрах,
 - подходят для всех типов осадков, даже для самых труднообрабатываемых, особенно для маслосодержащих осадков;
 - работа происходит в режиме «прямо в реактор» (без буферного резервуара), если после центрифугирования предусмотрена обработка в термических сушилках или печах.
 - обезвоживание проходит без фильтрующего материала, в результате не возникает дополнительных ограничений (промыака и т. п.).
 - существует возможность быстро изменять функции машины, переходить от более или менее сильного обезвоживания к уплотнению путем простого изменения рабочих переменных параметров (см. п. 6.4.2).
- Существуют и довольно серьезные недостатки при работе на этих аппаратах, что, однако, не мешает считать их крайне привлекательными: высокое потребление полимеров (см. табл. 22), значительное потребление энергии, необходимость установки защитных устройств от шума, специализированное техническое обслуживание, в ряде случаев необходимость монтажа вспомогательных устройств.

Таблица 22**Сравнение показателей работы центрифуг (Ц) и ленточных фильтров (ЛФ)**

Тип осадков	Содержание сухих веществ в кеке, %		Расход полимера, кг/т ВВ	
	Ц	ЛФ	Ц	ЛФ
ГСВ, осадки от продленной азрации	21±1	17±1	11±1	5±1
ГСВ, осадки Р/Вю = 50/50	26±1	22±1	9±1	4±1
ГСВ, осадки Р/Вю = 65/35	28±1	24±1	8±1	3,5±1,0
ГСВ, осадки Р/Вю = 80/20	30±1	27±1	6±1	3±1
ЛСВ Биологические осадки молочной промышленности	16±2	12±2	12±1	7±1
Питьевые воды При мутности исходной воды меньше 10 NTU	19±1	16±1	9±1	5±1
Питьевые воды При мутности исходной воды, равной 50–70 NTU	25±2	21±1	6±1	4±1



Фото 11. Цех фильтр-прессов

7. Фильтр-прессы

Фильтр-прессом называется аппарат для разделения твердой и жидкой фаз суспензии, работающий по принципу фильтрации под сильным давлением (используется фильтрующий материал с достаточно мелкими размерами пор)

Эти аппараты, наряду с центрифугами, применяются при обработке осадков чаще, чем какие-либо другие установки. Главным преимуществом фильтр-пресса является получение наиболее высоких значений содержания сухих веществ в кеке по сравнению с другими аппаратами механического обезвоживания.

Используя основные законы поверхностной фильтрации (законы Дарси и Кармана — см гл 3, п 5 1), можно оценить с помощью лабораторных методов (см гл 5, п 6 б) способность осадка к фильтрации под давлением (время фильтрации, окончательные значения содержания сухих веществ, выбор и дозировки кондиционирования и т д)

7.1. Числовые параметры, характеризующие фильтруемость осадков

7.1.1. Удельное сопротивление фильтрации

Удельным сопротивлением γ называется сопротивление кекa, осевшего на 1 м^2 фильтрующей поверхности, содержащего 1 кг сухого продукта и препятствующего фильтрации (или вытеканию фильтрата)

При многочисленных упрощающих допущениях (сопротивление фильтрующего носителя считается ничтожным по сравнению с сопротивлением кекa, масса взвешенных веществ, принесенных единицей объема фильтрата, заменяется концен-

трацией C взвешенных веществ в осадке) удельное сопротивление при давлении P (r_p) может быть рассчитано следующим образом.

$$r_p = \frac{2aPS^2}{\eta C}, \text{ м/кг.}$$

где:

- P — давление фильтрации;
- S — площадь фильтрующей поверхности;
- C — концентрация взвешенных веществ в осадке на входе в установку;
- η — динамическая вязкость фильтрата;
- a — угол наклона прямой, полученной во время теста на фильтруемость (рис. 32 — см. гл. 5, пп. 6.6.1 и 6.6.2).

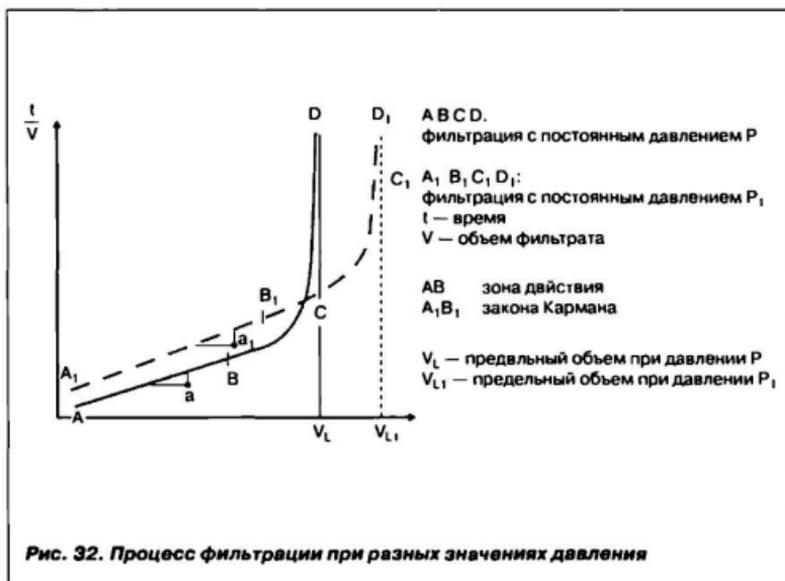


Рис. 32. Процесс фильтрации при разных значениях давления

Осадки принято сравнивать по их значениям $r_{0.5}$ (коэффициент фильтрации при относительном давлении 0,5 бар, или 49 кПа).

Значение $r_{0.5}$ для смешанных осадков ГСВ находится в диапазоне 10^{14} – 10^{15} м/кг, что несовместимо с прямым переводом осадков на фильтр-пресс. Таким образом, для этого типа осадков необходимо прибегать к кондиционированию (см. п. 3) для того, чтобы резко снизить значение $r_{0.5}$ до 10^{12} м/кг — такое значение уже позволяет обеспечить приемлемый процесс фильтрации и получение обезвоженного кека.

У гидрофобных и кристаллических осадков от процесса декарбонатации, а также у осадков, прошедших термическое кондиционирование (см. п. 2.2), исходные значения $r_{0.5}$ очень низкие (от 10^{11} до $5 \cdot 10^{11}$ м/кг), и, следовательно, нет необходимости

ти добавления вспомогательных реагентов для облегчения прохождения осадков через фильтр-пресс

7.1.2. Коэффициент сжимаемости

При повышении относительного давления происходит сжатие поровых пространств кека, что приводит к росту сопротивления фильтрации

$$r_p = 2^S r_{0,5} P^S$$

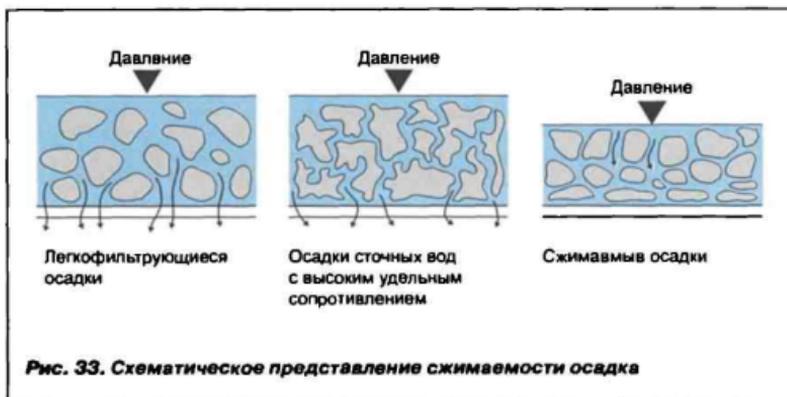
Коэффициент сжимаемости S определяется по наклону прямой $\lg r_p = f(\lg P)$ (см. гл 5, рис. 22) и влияет на режим фильтрации (см гл 5, п. 6 6 3)

Если $S < 0,7$, осадок плохо поддается сжатию и результативность фильтрации повышается с ростом P (для гидрофобных и кристаллических осадков, осадков, содержащих карбонаты или сульфаты кальция, оксиды железа, осадков от промывки газов и т. д.). В этом случае целесообразной является обработка под высоким давлением.

Если $0,7 < S < 1$ осадки обладают большей способностью к сжатию. Применение высоких давлений (12–15 бар) имеет смысл с целью добиться более высоких значений содержания сухих веществ (например, для городских осадков, хорошо кондиционированных с помощью минерализации)

Если $S > 1$ можно ограничиться давлением 7 бар, поскольку дальнейшее повышение давления не даст никакого выигрыша по фильтроциклу и не приведет к увеличению окончательного значения содержания сухих веществ (например, для труднообрабатываемых гидроксидных осадков, которые прошли недостаточное известкование)

На рис. 33 схематично представлены описанные выше варианты сжимаемости осадка



Примечание. Для городских осадков, кондиционированных с помощью полимера, значение S после дренажа превышает единицу. Тем не менее компания «Дегремон» все-таки использует высокие давления (15 бар) для улучшения сопряжения осадка с фильтрующим полотном и для облегчения отделения осадка (осадок становится менее клейким)

7.1.3. Предельное содержание сухого вещества

Тест на фильтруемость (см рис 32) позволяет измерить асимптотическое предельное содержание сухих веществ в осадке при разном давлении (см гл 5, п 6 7). Однако стремление добиться этого предельного значения в процессе эксплуатации сооружений является нецелесообразным с экономической точки зрения, так как в этом случае длительность фильтроцикла и уровни кондиционирования будут слишком высокими

Тем не менее предельное содержание сухих веществ в осадке является хорошим сравнительным параметром, который позволяет оценить трудности обезвоживания и определить предельные технологические параметры различных аппаратов обезвоживания. Оно может быть увеличено только в результате нагревания

7.2. Классический камерный фильтр-пресс

Фильтрация проходит под давлением в герметичных камерах. В отличие от ленточных фильтров в данном случае нет возможности для утечек осадков

Эта относительно старая технология все еще остается очень распространенной. Главное преимущество этого метода (часто определяющее его выбор) — это производство так называемого твердого кека, обычно содержащего около 30 % сухих веществ (таким образом, это значение является самым высоким при механическом обезвоживании). Но метод имеет и серьезные недостатки

- периодический характер работы (последовательные подачи, именуемые циклами),
- снижение расхода поступающего осадка в течение цикла,
- более высокие капитальные затраты по сравнению с другими вариантами механического обезвоживания,
- механическая выгрузка кека между циклами требует ручной работы оператора (по крайней мере, для большинства видов осадков).

Необходимо отметить несколько усовершенствований данного метода, сделанных в последние годы

- увеличение надежности кондиционирования осадков без применения извести,
- автоматизация некоторых моделей фильтр-прессов, но их механическую и операционную надежность необходимо проверять на всех видах осадков, особенно на гидрофильных, которые с трудом поддаются обработке

7.2.1. Общее описание классического фильтр-пресса

Фильтр-пресс (рис 34) состоит из батареи полых вертикальных плит (1), плотно соединенных и прижатых друг к другу с помощью мобильной головки (8), которая приводится в движение одним (или несколькими) гидравлическим домкратом (2), расположенным с одной из сторон батареи. Движение узла мобильной головки/пластины удерживается неподвижной головкой (9), которая расположена на другом конце батареи

Такая конструкция установки — в виде вертикальных плит, образующих герметичные камеры фильтрования (3), позволяет упростить механическое отделение кека («разгрузку»).

На двух профилированных поверхностях плит расположены фильтрующие полотна (4) с небольшим размером пор (от 10 до 300 мкм)

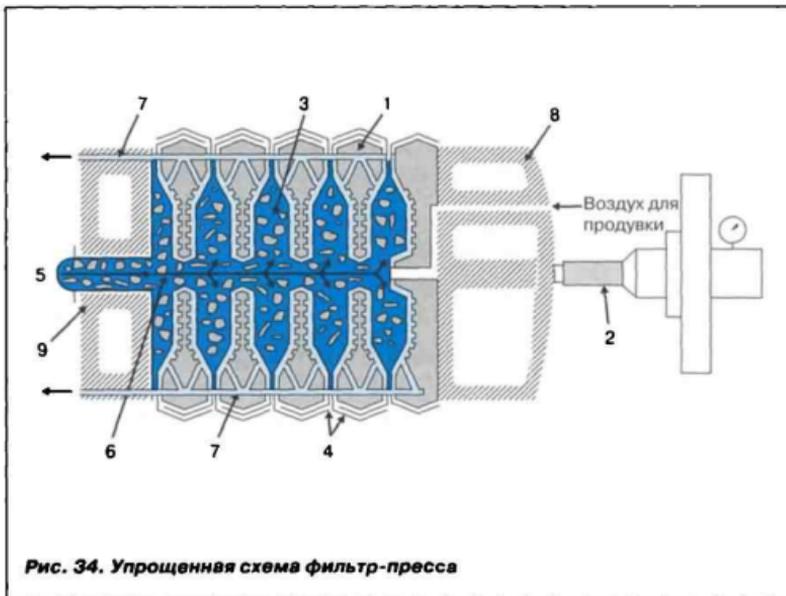


Рис. 34. Упрощенная схема фильтр-пресса

Осадки, подлежащие фильтрованию (5), подаются насосами в камеры фильтрации через отверстия (6), которые обычно расположены в центре плит. линейный ряд таких отверстий представляет собой трубопровод подачи осадков.

Твердые вещества постепенно накапливаются в фильтрационной камере вплоть до образования окончательного плотного и компактного кека

Фильтрат собирается в канавки плиты, расположенные с задней стороны фильтрующих полотен, а затем выводится из системы с помощью внутренних труб (7) (тем самым обеспечивается отсутствие вредных выбросов в окружающую среду).

Давление, создаваемое зажимными домкратами, должно рассчитываться таким образом, чтобы давление на поверхность стыка каждой фильтрующей плиты было бы выше внутреннего давления камеры, которое создается насосной системой подачи осадков.

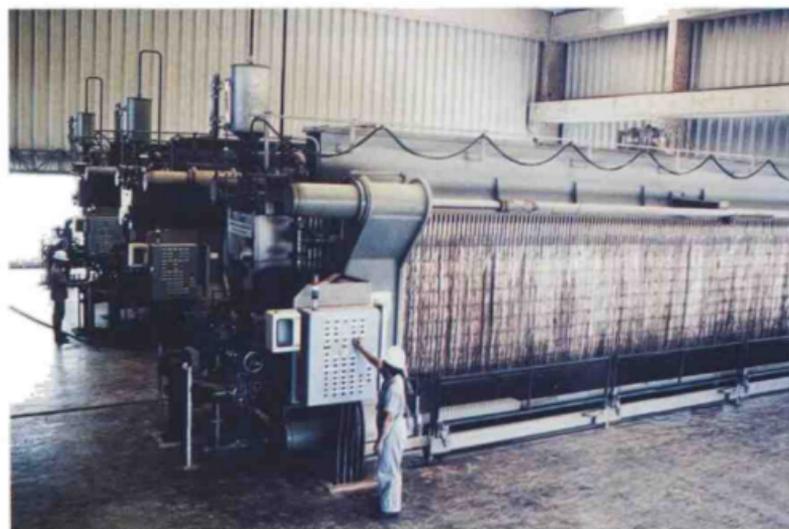
7.2.2. Способы реализации

В основном эти технологии различаются следующим.

- поддержка фильтрующих пластин бывает либо боковой на двух продольных балках (фото 12), либо подвесной на одной или двух верхних рельсах (фото 13);
- система трелевки (подтягивания) плит по очереди (электромеханическая или гидромеханическая — фото 14);
- система отжима: один или несколько гидравлических домкратов;
- система промывки полотен с помощью струй высокого давления; для промывки полотна (ткани) и канавки давление должно достигать 80–100 бар, при этом, чтобы давление воздействовало эффективно, промывной распределитель должен находиться близко к фильтрующим полотнам,



**Фото 12. Очистные сооружения «Aschèges», синдикат СИАПП.
Производительность 230 т СВ/сут на 14 фильтр-прессов с боковой подвеской
(140 плит размером 1500 x 1500 мм)**



**Фото 13. Установка в Бвруери (Бразилия) для очистки сточных вод
г. Сан-Пауло — три фильтр-пресса по 150 плит размером 2 x 2 м с рельсовой
подвеской**

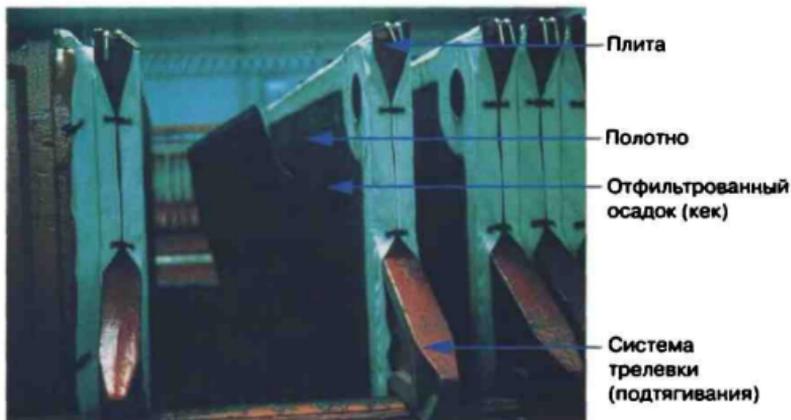


Фото 14. Подтягивание плиты фильтр-пресса

- коэффициенты защиты должны соответствовать значениям, принятым при расчете поддерживающей станины;
- размер аппаратов варьируется от самых небольших (20–30 плит размером 500 × 500 мм) до самых крупных (150–160 плит размером 2000 × 2000 мм), т. е. общий объем камер от 15 000 до 18 000 л и более 1000 м² фильтрующей поверхности на производственной площадке 40 м², что говорит о высокой компактности;
- применяемые давления 15 бар для стандартного варианта, но для определенных осадков некоторые изготовители предлагают модели, рассчитанные на 7 бар (более дешевые установки);
- толщина кека (выгружаемого осадка), глубина камер и, следовательно, окончательная толщина осадка выбираются в зависимости от происхождения осадка. При обработке плотных осадков с хорошей фильтруемостью значительная толщина кека (50 мм) позволяет увеличить длительность циклов. Для большинства городских осадков рекомендуемая толщина кека составляет 30 мм, что является хорошим компромиссом между длительностью цикла и массой кека;
- конструкция плит в настоящее время самым распространенным материалом является полипропилен (также можно встретить чугунные плиты, которые обычно устанавливаются на самых больших фильтр-прессах). Каждая плита имеет определенное число выступов, равномерно распределенных по поверхности. Эти выступы препятствуют деформациям внутренней части фильтрующих пластин, которые могут возникать при плохом заполнении фильтр-пресса;
- фильтрующие полотна, на большинстве установок используются ткани из синтетических волокон с моноволоконной структурой (полипропиленовые или полиамидилсановые материалы). Полотно обычно устанавливают на «подкладку» из более грубой ткани (что обеспечивает хороший отвод фильтрата и не создает дополнительных проблем для тонкого фильтрующего полотна).

Для гидроксидных осадков с очень мелкими хлопьями целесообразным является применение мультиволоконных и более плотных тканей.

При хорошем техническом обслуживании срок службы фильтрующих полотен превышает 2000 циклов

7.2.3. Цикл фильтрации

Работа фильтр-пресса основана на проведении последовательных сжатий. Каждое сжатие включает в себя несколько последовательных стадий

— **закрытие прессы** фильтр-пресс должен быть пустым, а мобильная головка, приводимая в движение домкратом (домкратами), прижимает плиты друг к другу. Давление закрытия регулируется автоматически в течение всего процесса фильтрации таким образом, чтобы обеспечить герметичность на поверхностях стыков.

— **заполнение фильтра** эта стадия является очень короткой (максимум 10 мин). Камеры фильтрации заполняются осадками с помощью подающих насосов. Время заполнения зависит от фильтруемости осадка (чем лучше фильтруемость, тем меньше время заполнения).

— **фильтрация** после заполнения камер продолжающееся поступление осадков вызывает увеличение давления и, следовательно, образование на фильтрующихся тканях слоя отфильтрованного осадка, толщина которого постоянно растет. Обычно максимальное давление фильтрации достигается через 30–45 мин. Продолжительность фильтрации может варьироваться от 1 до 5 ч в зависимости от глубины камер и фильтруемости осадка. Стадию фильтрации обычно прекращает реле времени (максимальное давление поддерживается в течение определенного времени, на которое устанавливается реле) таким образом, чтобы конечный объем фильтрата составлял от 5 до 10 л на 1 м² фильтрующей поверхности в час при кондиционировании осадка полимером и от 10 до 20 л/(м² ч) при минеральном кондиционировании. После остановки работы насосов фильтрации внутренние трубопроводы осадков и фильтрата продуваются сжатым воздухом.

— **выгрузка отфильтрованного осадка (кека)** мобильная головка отъезжает назад, чтобы открыть первую камеру фильтрации. Образовавшийся осадок падает под действием силы тяжести. Плиты выгружаются одна за другой с помощью механизированной системы. В зависимости от степени клейкости отфильтрованных осадков к фильтрующим тканям продолжительность выгрузки может составлять от 15 до 45 мин для фильтра, который включает 100 камер. Эта стадия требует присутствия оператора, так как большинство осадков с минимальной степенью кондиционирования или с кондиционированием полимерами образуют довольно клейкие отфильтрованные массы, которые необходимо удалять вручную с помощью скребка в целях обеспечения полной выгрузки кека.

К упомянутым четырем стадиям цикла фильтрации необходимо добавить **очень важную стадию чистки** — промывку ткани и желобов отведения фильтрата. Такая промывка проводится через каждые 10–15 циклов при кондиционировании полимерами и через каждые 30–40 циклов при минеральном кондиционировании. На крупных установках моечные машины (фото 15) работают автоматически и не требуют вмешательства оператора. Такие промывные машины синхронизированы с трелевой плит. Продолжительность промывки составляет приблизительно 2–3 ч. При массовом кондиционировании известью необходимо приблизительно каждые 500 циклов проводить чистку полотен и плит от устойчивых отложений. Обычно эта процедура проводится с помощью замачивания или с использованием циркуляции 5–7%-го раствора пассивированной соляной кислоты HCl.

Фильтр-пресс потребляет относительно небольшое количество энергии — около 25–35 кВт ч/т ВВ в зависимости от типа осадков.



Фото 15. Моечный аппарат фильтр-пресса для обработки осадков водопроводной станции «Mouille Dunkerque» (Франция)

7.2.4. Расчет фильтр-пресса

Необходимо знать следующие параметры — M — количество ВВ (осадки + введенные реагенты кондиционирования), которые требуется отфильтровать за рабочий день;

— T — общее время цикла (зависит от толщины отфильтрованного слоя и удельного сопротивления γ_{05} кондиционированного осадка), время цикла T позволяет определить число циклов K , которые можно провести за один рабочий день (в зависимости от рабочего времени),

— S_f — окончательное содержание сухих веществ (СВ) в отфильтрованном осадке,
— d — плотность отфильтрованного осадка

Габаритные характеристики фильтр-пресса определяются общим объемом камер фильтрации, который рассчитывается следующим образом

$$V_T = \frac{M}{K S_f d} \cdot n,$$

где M , кг ВВ/сут, S_f , доля от СВ/100 (где СВ измеряется в процентах)

Таким образом, для компромиссного экономического решения необходимо найти оптимальное соотношение количества отфильтрованного осадка и размеров плит

Необходимо отметить, что фильтр-пресс — это аппарат механического обезвоживания, имеющий наилучшие результаты по разделению фаз (порядка 98–99 %)

7.2.5. Результаты обезвоживания осадков после их минерального кондиционирования

В табл. 23 приведены результаты обработки некоторых гидрофобных осадков (без кондиционирования), некоторых гидрофильных осадков минерального характера (кондиционирования с помощью простого известкования), а также гидрофильных осадков органического характера (двойное кондиционирование с помощью соли железа и известкования).

На рис. 35 схематично представлен цех обезвоживания осадков с их минеральным кондиционированием

7.2.6. Результаты обезвоживания осадков, кондиционированных полимерами

Кондиционирование полимерами является чрезвычайно привлекательным с экономической точки зрения, так как оно не вызывает увеличения количества отходов (что происходит при минеральном кондиционировании, где вводятся большие дозы извести) Однако в результате обработки большинства осадков получается довольно клейкая масса, что влечет за собой увеличение времени выгрузки, а также необходимость вмешательства операторов при сбросе осадка

Таблица 23

Примеры результатов обезвоживания на фильтр-прессе осадков после их минерального кондиционирования

Тип осадка	Категория осадка	Концентрация % СВ	Кондиционирование		Цикл ¹ ч	Содержание СВ в кеке %
			FeCl ₃ ВВ %	Ca(OH) ₂ ¹ ВВ %		
Гидрофильные органические	ГСВ, Р/Вю = 80/20 (свежие)	6-7	3-5	20-30	2 0-2 5	35-40
	ГСВ, Р/Вю = 50/50 (свежие)	4 5-6,0	4-6	25-35	2,5-3 0	33-37
	ГСВ продленная аэрация	3-5	7-9	35-45	3-4	31-34
	ГСВ, Р/Вю = 50/50 (сброженные)	3-4	4-6	25-35	3,0-3,5	33-37
	ГСВ первичные физико-химические (свежие)	6-8	3-4	20-25	2 0-2 5	35-40
	ПСВ Биологические осадки аграрнопищевой промышленности	3-4	8-12	35-50	3 5-4 5	30-33
Гидрофобные минеральные	Декарбонатация (CaCO ₃ > 85 %)	30-50			1 0-1 5 (на 45 мм)	70-80
	Промывка газов	10-20			1-1,5	60-70
Гидрофильные минеральные	Осадки водопроводных станций	1,5-2 5		40-60	3 5-5 0	28-32
	Малоагрязненная исходная вода					
	Осадки водопроводных станций сильноагрязненная исходная вода	2 5-4,0		20-30	3-4	30-40
	ПСВ Гальваношлак	2 0-3 5		5-15	2 5-4	28-35
	Анодизация алюминия (щелочная нейтрализация)	2-3		10-20	3-4	30-40
Маслосодержащие	ПСВ Осадки маслосодержащих вод. Кислотное расщепление	2,0-3,5		5-10	2,5-3 5	50-60

¹ Толщина слоя осадка составляет 30 мм (если не указаны другие данные)

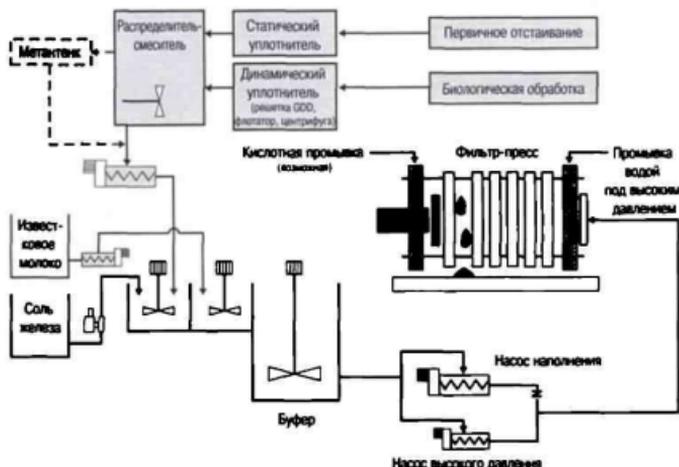


Рис. 35. Городские очистные сооружения. Схема фильтр-пресса с минеральным кондиционированием осадков

Чтобы уменьшить клейкость органических осадков, к полимерам необходимо добавлять хлорное железо

Благодаря введению минерального реагента получаемые значения содержания сухих веществ будут более низкими, а кек будет иметь более рыхлую структуру

В табл. 24 приведены некоторые результаты обработки осадков городских сточных вод. На рис. 36, 37 и 38 показаны примеры применения кондиционирования полимерами в цехе фильтр-пресса

Таблица 24
Обработка на фильтр-прессах осадков городских сточных вод, кондиционированных полимерами

Категория осадка	Концентрация, % СВ	FeCl ₃ , % от ВВ	Расход полимера, кг АВ/т ВВ	Цикл ¹ , ч	Содержание СВ в кеке, %
От продленной азрации	4–5	2–5	5–7	3–4	25–29
От процесса Р/Вю = 70/30 (свежие)	4,5–6,0	2–3	3–4	2–3	33–36
От процесса Р/Вю = 50/50 (свежие)	4–5	3–4	5–6	2,5–3,5	30–34
От процесса Р/Вю = 50/50 (сброженные)	3–4	4–5	3–4	3–4	30–34

¹ С толщиной отфильтрованного осадка 30 мм

Установки со смешанным кондиционированием (минеральным с использованием извести или полимерами — см рис 37) также вызывают интерес. Известкование позволяет применять отходы обезвоживания в сельскохозяйственном производстве. Если это невозможно, то применение полимеров дает возможность провести последующую термическую сушку или сжигание с сохранением приемлемых значений содержания сухих веществ и максимальной величины теплоты сгорания по низшему пределу

7.3. Фильтр-пресс с мембранными плитами

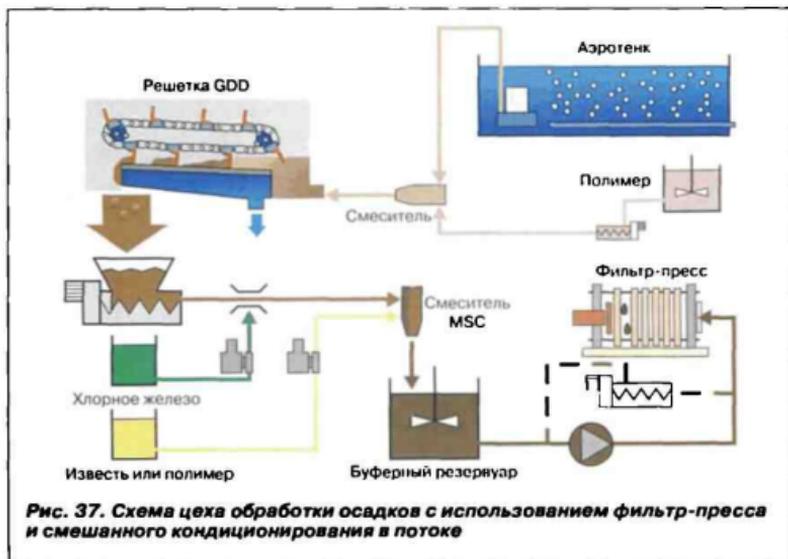
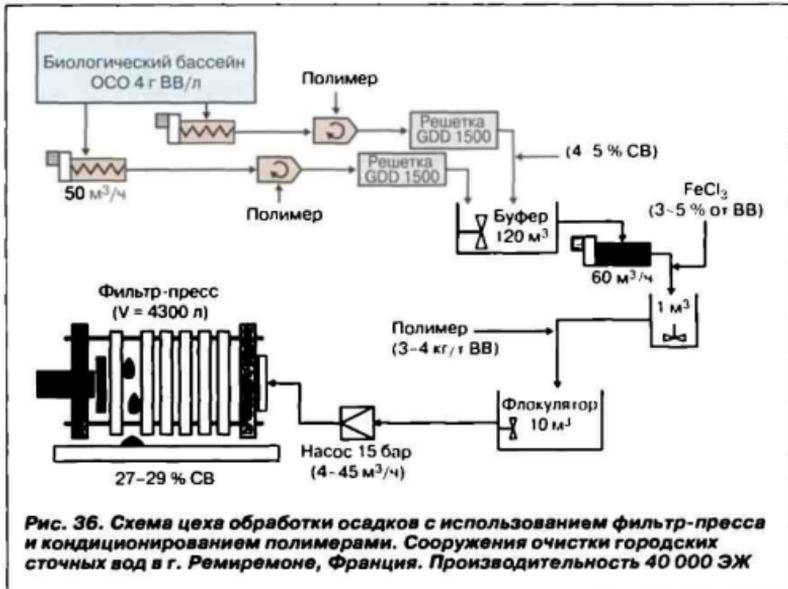
7.3.1. Описание фильтров и показатели работы

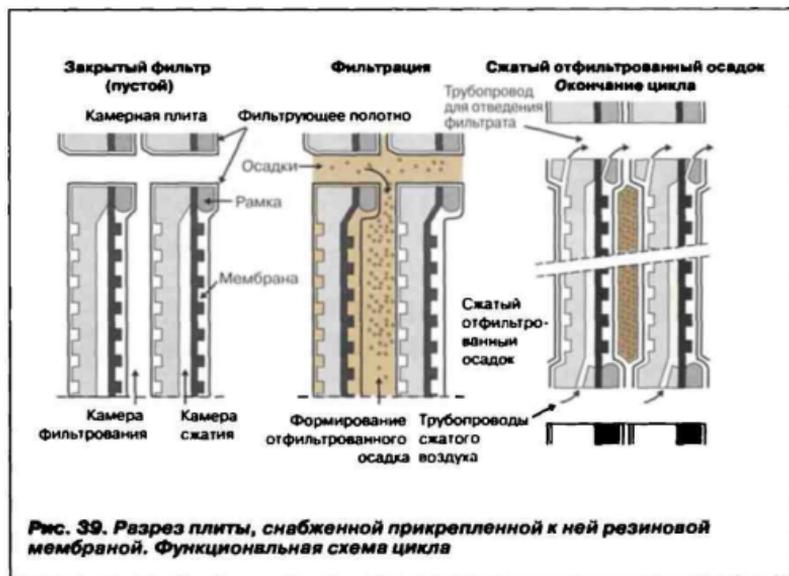
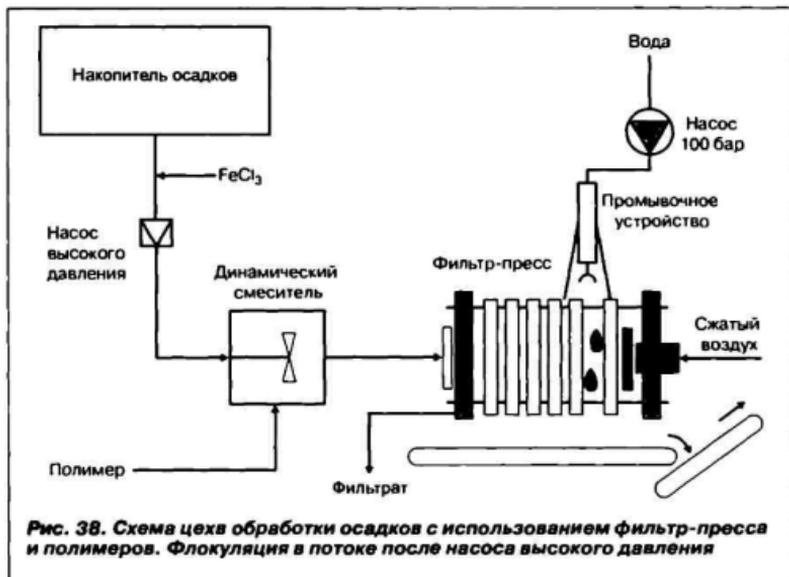
Несмотря на довольно высокую стоимость, эти фильтры применяются все чаще. Внешне они напоминают традиционные установки, однако одна из внутренних поверхностей каждой камеры снабжена полипропиленовой (вариант со встроеной мембраной) или резиновой мембраной (в этом варианте мембрана закреплена на плите, и, следовательно, ее можно заменять). Другая сторона камеры фильтрации остается классической (рис 39)

Мембраны подвергаются воздействию давления сжатого воздуха или воды (15 бар).

Рабочий цикл проходит в следующем порядке:

- подача суспензии на фильтр с помощью насоса с давлением 6–7 бар.





- предварительное формирование отфильтрованного осадка под этим давлением,
- остановка работы насосов и надувание мембран в течение 15–45 мин в зависимости от качества осадка;
- традиционная выгрузка

В отличие от традиционного фильтр-пресса мембрана позволяет **равномерно распределять давление** по всей поверхности отфильтрованного осадка. Таким образом, содержание сухих веществ возрастает, и отфильтрованный осадок становится более однородным. Кроме того, такие осадки легче выгружать, так как они содержат меньше клейких влажных включений. Этот тип фильтра больше всего подходит для осадков, кондиционированных полимерами.

Увеличение содержания сухих веществ по сравнению с обычными фильтрами будет очень сильно зависеть от типа осадков и вида кондиционирования.

- при минеральном кондиционировании (известковании) увеличение содержания сухих веществ может составлять в большинстве случаев 4–5 %;
- при кондиционировании полимерами (когда коэффициент сжатия близок к единице) увеличение этого значения не так велико и обычно составляет 2–3 %. Выигрыш в производительности может быть различным
- для гидрофобных минеральных осадков с хорошей фильтруемостью производительность может быть увеличена на 30–40 % по сравнению с классическими фильтр-прессами;
- для трудных осадков не всегда есть возможность повысить производительность (например, для органических осадков с кондиционированием полимерами). Тем не менее преимущества легкой процедуры выгрузки оправдывают дополнительные производственные затраты.

Установки мембранных фильтр-прессов более сложны по своей конструкции (независимая подача жидкости для создания давления на мембраны в каждой плите), а также требуют большего технического обслуживания (периодическая замена мембран).

Процессом выгрузки отфильтрованного осадка всегда требуется управлять (кроме некоторых типов осадков), поэтому такие фильтры нельзя назвать автоматическими.

7.3.2. Нагревающий фильтр-пресс

В этой технологии воздействие тепловой энергии сочетается с процессом механического обезвоживания. Сжатие происходит по классической схеме. По окончании цикла фильтрации начинается цикл нагревания. Нагрев (с помощью горячей воды при температуре 90 °C) происходит опосредованно с помощью самих плит — их конструкция предусматривает наличие циркуляционных каналов, и таким образом, они одновременно служат нагревательными пластинами.

Чтобы облегчить процесс сушки, в трубопроводах фильтрата создается небольшое разрежение (что подразумевает полную герметичность на поверхностях стыка и по окружности, обеспечиваемую с помощью резиновых уплотнителей).

Имеется возможность проводить глубокую сушку (до 90 % сухого вещества), однако это не оправдано с экономической точки зрения (время сушки составляет 24 ч). Но частичная сушка (до 35–45 % сухого вещества) может оказаться целесообразной (например, для обеспечения самосгорания осадков продленной аэрации с кондиционированием полимерами). В этом случае время сушки составляет всего от 2 до 4 ч. Еще одно преимущество данной технологии заключается в очень легкой

разгрузке фильтр-пресса, так как отфильтрованный осадок легко отстает от фильтрующих полотен

В настоящее время такие установки используются довольно редко из-за высоких инвестиционных затрат и недостаточной (по обеспечению герметичности) механической надежности

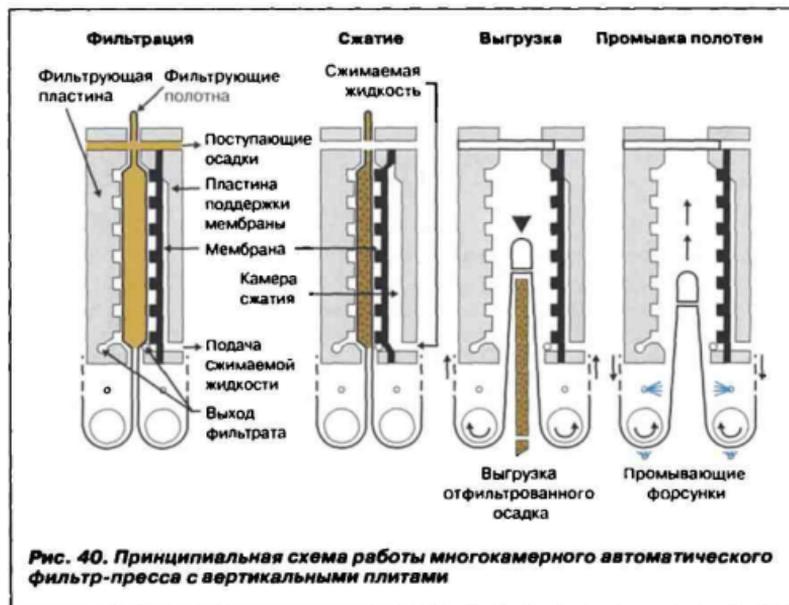
7.4. Автоматический фильтр-пресс

Многие попытки создать автоматические фильтр-прессы потерпели неудачу. Было разработано несколько оригинальных инженерных конструкций, однако механическая надежность многих таких установок не подтвердилась, и в результате многие разработки просто исчезли с рынка.

Тем не менее некоторые автоматические установки стали использоваться на практике. При этом необходимо помнить, что при обработке клейких осадков работа автоматики может давать сбои (например, для органических осадков, кондиционированных полимерами)

■ Мембранный фильтр-пресс с системой встряхивания фильтрующих полотен

Полотна, прикрепленные к вибрирующей или подвижной системе, могут отсоединяться от плит и, за счет своего движения, обеспечивать выгрузку отфильтрованного осадка. Этот способ достаточно надежно работает на минеральных тяжелых



осадках и даже на органических осадках с сильным известкованием. Срок службы полотен, конечно, будет меньше из-за возникающих напряжений.

■ Мембранный фильтр-пресс с системой встряхивания плит

Все плиты одновременно раздвигаются и начинают прерывисто двигаться (за счет работы эксцентриковой детали) с небольшой амплитудой. Эта технология применяется для осадков с высокой плотностью (осадки после декарбонатации, промывки газа и т. п.).

■ Мембранный фильтр с системой сворачивания полотен (рис. 40)

При открытии фильтра все плиты раздвигаются, вызывая одновременную выгрузку отфильтрованного осадка. Таким образом, время простоя значительно сокращается. Кроме того, когда фильтр находится в открытом состоянии, фильтрующие полотна, присоединенные к подвижной системе, сворачиваются вниз, провоцируя выталкивание отфильтрованного осадка (работа устройства дополняется склеиванием остаточного отфильтрованного осадка и промывкой фильтрующих полотен).

Такие фильтр-прессы имеют высокую производительность, но вследствие своей концепции они применяются только для осадков с хорошей фильтруемостью, содержащих только мелкие частицы (небольшие входные отверстия в камеры).

Стоимость таких установок высока, поэтому на практике при обработке осадков их используют довольно редко (за исключением осадков после декарбонатации, металлосодержащих осадков и т. п.).

■ Мембранный фильтр-пресс с автоматическим скребком

В данном случае система трелевки (подтягивания) плит соединена с системой скабливания осадков. Происходит отодвигание ткани и спуск скребка. Механическое устройство имеет сложную и точную конструкцию и требует тщательного контроля и технического обслуживания. Тем не менее на таких установках удается успешно обрабатывать даже клейкие осадки. При условии достаточной механической надежности эти фильтр-прессы могут найти широкое применение.

7.5. Другие методы фильтрации

7.5.1. Сушка осадков на слое песка

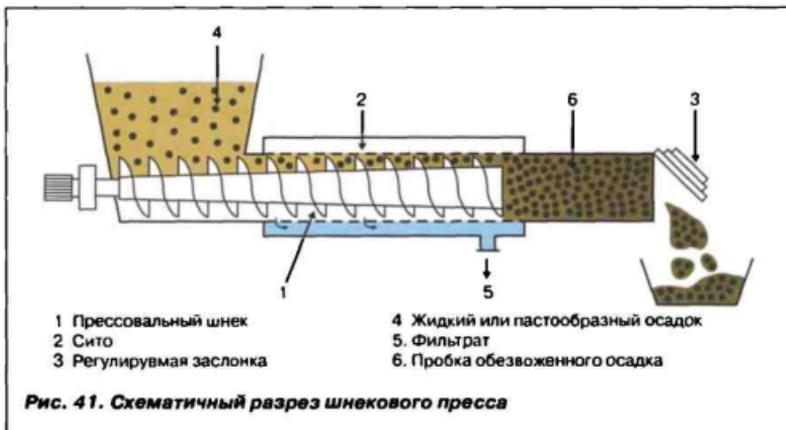
Такая технология все еще применяется (с возможным кондиционированием полимерами, чтобы ускорить фазу дренажа) в странах, где выпадает мало атмосферных осадков. В среднем необходимо 3–4 нед для просушки жидкого осадка слоем 30–40 см.

Этот способ используется все реже из-за больших размеров полезной поверхности, а также в связи с необходимостью привлекать большое число работников для сбора конечного продукта.

Существует несколько редких примеров применения механизированной сушки (используются сушильные элементы шириной 20 м и длиной 1 км, подача осадков производится насосами и с помощью разбрызгивания, а сбор полученных масс — с помощью специальной автоматической борозы).

7.5.2. Лагуны обезвоживания

Лагуны обезвоживания (иловые пруды) используются в странах, где редко идут дожди и, значит, нет необходимости тратить средства на химические реагенты для проведения обезвоживания.



Эти иловые пруды (небольшой высоты — приблизительно 1,8 м) работают только по принципу испарения (следовательно, необходимо иметь герметичное дно во избежание загрязнения грунта). Сушка происходит последовательно слоями осадков. Таким образом, необходимо иметь в наличии несколько лагун для обеспечения ротаций. Когда на дне лагуны остается приблизительно 1 м высохших осадков (30–40 % содержания сухих веществ), то их извлекают с помощью бульдозеров и транспортируют в зону складирования.

Расчет необходимых сооружений основан на определении испарительной мощности данной территории (учитывается фактор сезонности). Данный метод можно применять только для очень хорошо стабилизированных осадков, поскольку в противном случае возможно вредное воздействие на окружающую среду.

7.5.3. Вакуумные фильтры с вращающимся барабаном

Такие фильтры практически перестали применяться. Осталось лишь несколько установок, обрабатывающих осадки после декарбонатации и промывки газов.

Действительно, в вакуумных фильтрах можно обрабатывать только осадки с очень хорошей фильтруемостью, что влечет за собой необходимость проведения серьезного кондиционирования и большие энергозатраты. Кроме того, они требуют трудоемкого технического обслуживания. С учетом изложенного такие установки были заменены ленточными фильтр-прессами и центрифугами.

7.5.4. Шнековые прессы

Такие прессы (рис. 41) позволяют развивать большое давление, но они применяются исключительно для осадков целлюлозной промышленности и при условии, что содержание волокон превышает 45–50 %, поэтому данные установки используются крайне редко.

Перед поступлением на шнековый пресс осадки должны проходить сгущение (например, на решетках **GDD/GDE**) таким образом, чтобы в пресс попадали только очень густые осадки. Шнек медленно вращается в перфорированном цилиндре, постепенно сжимая осадок. Сжатие происходит за счет воздействия пробки обезвоженных осадков, которая образуется на выходе шнека.

При обработке осадков с достаточным количеством волокон содержание сухих веществ в квеке может достигать 45–55 %. Производительность установки составля-ет от 600 до 1000 кг ВВ/ч для шнека диаметром 600–650 мм.

Шнековые прессы также можно устанавливать после ленточных фильтров, чтобы по-высить на 10–15 пунктов содержание сухих веществ в конечном продукте. Эти установ-ки требуют серьезного технического обслуживания (из-за риска износа шнека)

8. Транспортировка и складирование осадков

Оборудование для транспортировки и концепция складирования должны выби-раться в зависимости от физико-химических свойств осадков. Концентрация сухих веществ (сухость), реологические показатели (вязкость, тиксотропные свойства, угол откоса), а также структура осадков (клейкая, порошкообразная, гигроскопич-ная) также являются важными критериями для выбора способа **транспортировки** и

Таблица 25

Тип транспорта в зависимости от содержания сухих веществ в осадке

Вид технического средства	< 1,5 %	От 1,5 до 6 %	От 6 до 12 %	От 12 до 30 %	От 30 до 45 %	От 45 до 65 %	> 65 %
Центробежные насосы	+						
Вихревые центробежные насосы	+	(+)					
Объемные насосы с эксцентриковым ротором	(+)	+	+	+			
Объемные перистальтические насосы	(+)	+	+				
Объемные лопастные насосы	(+)	+	+				
Поршневые/мембранные насосы		+	+				
Поршневые насосы + подающее устройство				+	+	(+) 50 % макс.	
Цепной конвейер + скребок (типа «Redler»)				+	+	+	+
Цепной конвейер трубопроводный или канализационный							+
Пневматический транспортер							+
Шнек без сердечника				+	+	+	+
Шнек с сердечником				(+)	(+)	+	+
Ленточный транспортер				+	+	+	+
Ковшовый элеватор							+

Примечание + — рекомендуется, (+) — возможно

хранения осадков: можно использовать насос, конвейерный транспортер, механический или пневматический погрузчик или другое оборудование.

Для грамотного проектирования и определения размеров **размеров полигонов для складирования** необходимо знать химический состав осадков (содержание сухих веществ, степень стабилизации органических веществ, наличие летучих компонентов, хлора и т. п.), а также гранулометрические показатели (размер частиц, наличие пыли и т. д.).

Приоритетной задачей является выбор оборудования, соответствующего типу осадков, чтобы создать условия для оптимальной работы цеха обработки осадка,

Таблица 26
Преимущества и недостатки оборудования для транспортировки (погрузки/разгрузки) осадков

	Преимущества	Недостатки	Примеры применения	
НАСОСЫ	Центробежные	- Низкая стоимость	- Производительность зависит от нагрузки на входе и от реологических свойств - чувствительность к присутствию волокон - риск сбоя при включении если присутствует растворенный воздух	- Первичные и малоконцентрированные биологические осадки
	Вихревые центробежные (шнековые)	- Низкая чувствительность к присутствию волокон	- Производительность такая же, как у центробежных насосов	- Первичные осадки с риском в случае присутствия волокон
	Объемные с эксцентриковым ротором	- Широкая распространённость, - регулируемая производительность	- Тенденция к разрушению структуры квка, - необходимость защиты от работы всухую, - чувствительность к присутствию песка и волокон (рекомендуется предварительное растривание осадка)	- Первичные уплотненные биологические сфлотированные, сброженные, кондиционированные, обезвоженные осадки (+ бункер с механическим устройством предотвращения образования твердых сводов осадка в нем)
	Объемные перистальтические	- Высокая производительность, - низкая чувствительность к присутствию волокон	- Высокие затраты при больших объемах обработки, - необходимость периодической замены перистальтической трубки	- Первичные уплотненные или неуплотненные осадки
	Объемные лопастные	- Простое обслуживание, - компактность, - меньшая чувствительность к присутствию волокон	- Более дорогостоящие по сравнению с насосами с эксцентриковыми роторами	- Применение аналогично насосам с эксцентриковым ротором (максимум 10 бар)
	Поршневые/мельничные	- Объемный насос обеспечивает подачу на большие дистанции, - высокая производительность	- Высокая стоимость технического обслуживания	- Осадки, кондиционированные перед фильтр-прессом, - сброшенные осадки подаваемые на термическое кондиционирование
	Поршневые + подающее устройство	- Транспортировка осадков с высоким содержанием СВ (до 40-45%), - транспортировка на длинные дистанции	- Высокая стоимость технического обслуживания	- Обезвоженные осадки с высоким содержанием СВ для подачи в печи сжигания

Таблица 26 (окончание)

	Преимущества	Недостатки	Примеры применения	
ТРАНСПОРТЕРЫ	Цепной конвейер + скребок (типа Redler-)	- Закрытая транспортировка осадков с высоким содержанием СВ (> 25 %), - сохраняется структура осадков	- Высокая стоимость (оборудование и запасные части), - высокий уровень шума, - одна установка / изменение направления, - риск блокировки в случае вязких осадков	- Обезвоженные, высушенные осадки (максимальное содержание СВ 65 %), - загрузка бункров и силосных ям
	Цепной конвейер в трубе	- Отсутствие зазоров, возможны изгибы траектории и смены направления, - возможность вертикальной установки, - низкий уровень шума - отсутствие истирания	- Высокая стоимость, - чувствительность к вязким осадкам, особенно при высокой влажности на входе	- Высушенные осадки - осадки с устойчивой структурой
	Пневматический транспортер	- Простая конструкция, возможны изгибы и изменение направления	- Риск образования пыли и мелких частиц	- Высушенные осадки
	Шнек без сердечника	- Нет разрушения структуры осадка, - простое и чистое решение	- Углы наклона < 30°	- Обезвоженные осадки
	Шнек с сердечником	- Возможность вертикальной установки (максимальная высота 5 м)	- Не рекомендуется для вязких осадков, - чувствительность к наличию волокон	- Обезвоженные осадки (если позволяет система подачи), - высушенные осадки
	Ленточный конвейер	- Транспортировка на длинные дистанции - невысокие капитальные затраты	- Одна установка / изменение направления, - необходимость соблюдения осторожности в случае вязких осадков, - защита от плохих погодных условий, - углы наклона < 30°	- Обезвоженные осадки, - высушенные осадки
	Дренажирующий транспортер	- Возможно изменение направления, - транспортировка на длинные дистанции, - более чистое решение, чем конвейеры	- Высокая стоимость	- Обезвоженные осадки, - высушенные осадки
Ковшовый элеватор	- Вертикальная транспортировка, - не изменяется granulометрический состав осадков (нет истирания)	- Риски, связанные с возмущением пыли (необходима защита)	- Высушенные осадки или осадки с хрупкой структурой	

которые будут обеспечивать доступность осадков и максимальный уровень безопасности.

8.1. Транспортировка осадков

При выборе транспортного оборудования, особенно насосов и транспортеров, необходимо в первую очередь учитывать содержание сухих веществ в осадках. В табл. 25 приведены только приближенные данные, так как для окончательного выбора оборудования необходимо учитывать многие другие критерии, такие как структура осадков и тип установки на последующей стадии.

В табл. 26 показаны преимущества и недостатки различных систем транспортировки осадков.

8.2. Складирование осадков

Таблица 27

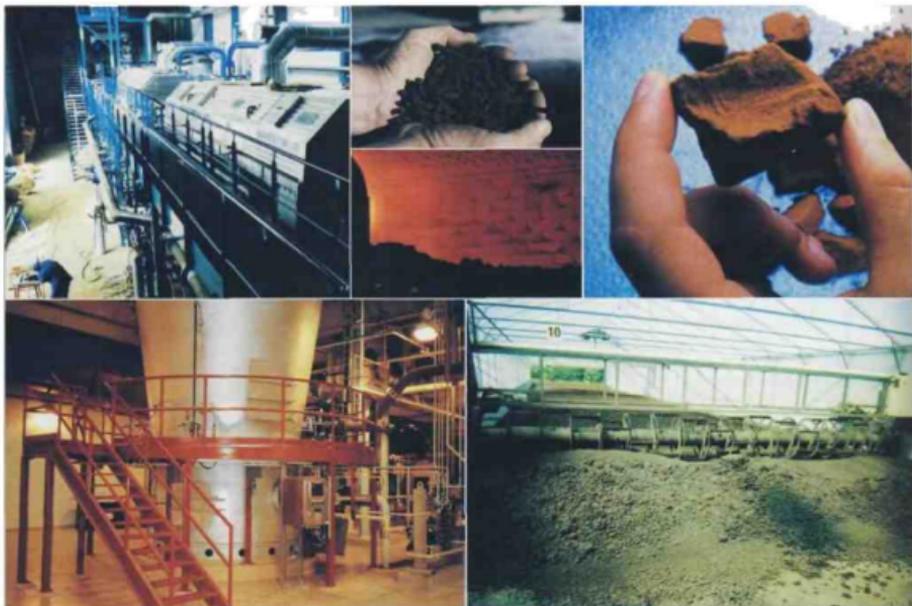
Тип складирования в зависимости от качества осадков

Тип складирования	Жидкие осадки	Пастообразные осадки	Твердые осадки (после фильтр-пресса, высушенные)
Складирование с системой перемешивания (механическая мешалка, продувка воздухом)	+		
Насыпное складирование в крытом сооружении		+	+ (фильтр-пресс) + (высушенные осадки)
Складирование навалом в крытых отсеках		+	+ (высушенные осадки)
Складирование в больших мешках			+ (высушенные осадки)
Складирование в вагонетках		+	+

8.3. Безопасность

Операции по транспортированию и складированию осадков обязательно должны производиться с учетом аспектов безопасности, связанных:

- с выделением неприятных запахов или токсичных газов, которые могут быть взрывоопасными (CH_4 , H_2S , меркаптаны, CO , NH_3),
- с образованием пыли в сооружениях и в цехе (см. гл. 19, п. 3.10, сушка)



Глава

19

1.	КОМПСТИРОВАНИЕ ОСАДКОВ	1266
2.	ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ОБЕЗВОЖЕННЫХ ОСАДКОВ.....	1272
3.	СУШКА	1274
4.	ТЕРМИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАЗЛОЖЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ ОСАДКОВ	1295
5.	МЕТОДЫ ОЧИСТКИ ДЫМОВЫХ ГАЗОВ ПОСЛЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ОСАДКОВ	1318
6.	РАЗЛОЖЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ С ПОМОЩЬЮ ЖИДКОФАЗНОГО ОКИСЛЕНИЯ	1332
7.	НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ	1342

Обработка обезвоженных осадков

В гл. 18 рассматривались способы, применяемые для обработки жидких осадков (стабилизация и обезвоживание). Данная глава посвящена технологиям обработки обезвоженных осадков, после которой осадки можно направлять на использование в соответствии с их конечным назначением (в частности, применение в сельском хозяйстве и ландшафтном строительстве, энергетическая утилизация, захоронение конечных отходов и т. д.). В настоящее время такие технологии обработки строго регламентируются нормативными документами, упомянутыми в гл. 2, п. 6.3. Термические же методы (такие как сушка, сжигание, газификация) имеют свою специфику, о которой также пойдет речь в этой главе.

Необходимо отметить два отдельных случая обработки осадков

- известкование обезвоженных осадков (см. гл. 18),
- жидкофазное окисление. Несмотря на то что эта технология применяется для обработки жидких осадков, ее описание приводится в данной главе, так как в ее основе лежит термическая обработка.

Таким образом, настоящая глава посвящена компостированию осадков, а также всем термическим методам сушки и разложения содержащихся в осадках органических веществ (ОВ).

1. Компостирование осадков

Нормативные ограничения, которые постоянно ужесточаются, заставляют предприятия, производящие осадки, соблюдать новые правила обработки и вывоза осадков, которые обуславливают решение следующих вопросов:

- снижение объемов отходов;
- хранение в течение длительных периодов;
- обеззараживание,
- изменение структуры осадков;
- биологическая стабилизация,
- улучшение агрономических показателей,
- изменение вида и состава осадков в целях повышения их привлекательности для потенциальных потребителей

Компостирование осадков позволяет решить все вышеперечисленные задачи при условии, что соответствующие технологии тщательно контролируются. Компостирование осадков городских сточных вод (ГСВ) приводит к выработке **влажных органических обеззараженных удобрений**, которые можно использовать на коммерческой основе (например, в соответствии с нормами, подобными французскому стандарту NFU 44095) для садоводства, цветоводства, производства рассады, виноградарства, лесоводства, восстановления истощенных почв, а также для их обогащения, если осадки имеют приемлемый уровень содержания тяжелых металлов. В крайнем случае компост может направляться на полигоны, специально предназначенные для приема отходов с высоким содержанием сухих веществ (для восстановления растительности)

В связи с высокими капитальными затратами и эксплуатационными расходами используемых площадок компостирование осадков пока еще применяется недостаточно широко

Использование конечного продукта на коммерческой основе требует серьезного изучения рынка. Кроме того, необходимо найти близко расположенный источник легкодоступных и недорогих обезвоженных осадков, а также используемого для них углеродного носителя

1.1. Принципы и условия применения

Компостирование представляет собой управляемую ферментацию, при которой **азробным путем** ОБ осадков преобразуются в стабильные гумусовые и перегнойные смеси (рис 1) Аэрация может быть эффективной только в том случае, если воздух имеет возможность проникать в рабочую среду. Так как обезвоженные осадки зачастую имеют низкую пористость, в них необходимо добавлять увеличивающие объем агенты, которые обычно присутствуют в углеродном носителе (необходимо добиться как минимум 20 % пустот в смеси).

Разложение ОБ с помощью различных микроорганизмов (рис 2) сопровождается повышением температуры до 70 °С и выше. В результате происходит процесс разложения патогенных микроорганизмов и снижение влажности продукта (вследствие испарения)

Компостирование обычно применяется для обработки свежих осадков (с высоким содержанием ОБ и азота), но может также использоваться и для сброженных или стабилизированных азробным способом осадков.

Среда, в которой будет проходить компостирование, должна отвечать следующим требованиям.

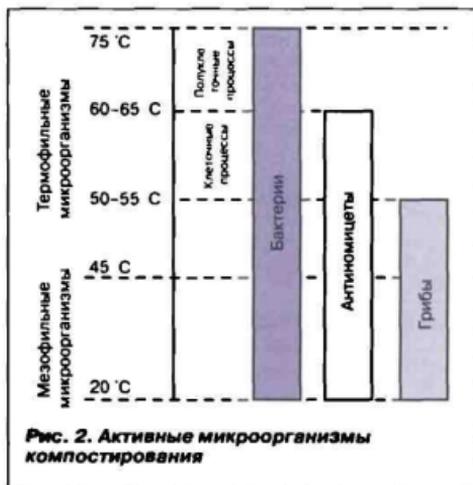
- микрофлора в ее обычном состоянии должна существовать либо в воздухе, либо в осадках, что делает ненужным дополнительный посев (обсеменение),
- значение pH среды не является ключевым для успешного проведения компостирования, так как кислотный баланс очень быстро устанавливается в пределах 6,5–8 (в начале компостирования происходит подкисление среды, а затем при



образовании аммиака проходит ее подщелачивание с удалением CO₂ путем взрации) Компостированию могут подвергаться даже осадки ГСВ, прошедшие физико-химическую обработку

1.1.1. Содержание сухих веществ в исходной смеси и в конечном компосте

Аэрация позволяет ввести в осадки кислород для биологического окисления, а также вывести водяной пар и углекислый газ, которые образуются



в компостной массе. Обезвоживание за счет воздушной циркуляции проходит более эффективно в хороших климатических условиях

Оптимальный уровень влажности исходной смеси находится в диапазоне 55–65 % (при 35–45 % сухого вещества)

Чем больше в осадках содержится ОВ, поддающихся биоразложению, тем интенсивнее будет происходить испарение воды под воздействием экзотермических реакций биологического разложения, и следовательно, содержание сухих веществ (СВ) также будет более высоким. На практике же, для того чтобы содержание СВ в компосте после трехнедельного цикла аэрации было выше 50 %, необходимо, чтобы индекс I (количество килограммов воды на 1 кг биоразлагаемых ОВ в исходной смеси) был меньше 10.

Достижение высокого содержания СВ в конечном компосте требует значительных расходов энергии (в связи с большим объемом продуваемого воздуха) Эти расходы могут составлять более 80 % от общего энергопотребления

1.1.2. *Баланс питательных веществ*

Динамику микробиологического процесса определяет соотношение содержания углерода к азоту (С/N). Поэтому важным фактором является форма, в которой углерод находится в подлежащих обработке осадках, а также в дополнительных продуктах

— углерод, плохо усваиваемый микрофлорой, снижает кинетические параметры разложения и преобразования ОВ осадка. В таком случае азот, который зачастую образуется в избыточных количествах, будет выделяться в виде аммиака (этот компонент чаще всего встречается в газовой фазе, образующейся при проведении компостирования);

— если углерод легко усваивается микрофлорой, то может возникнуть необходимость увеличения дозы азота, чтобы не снижать кинетику микробных процессов [например, для некоторых осадков промышленных сточных вод (ПСВ)]

Содержание углерода в подлежащих компостированию осадках будет изменяться в зависимости от их типа — оно больше в свежих осадках, чем в сброженных, и в первичных, чем в биологических.

Дополнительные продукты, часто используемые на промышленных площадках компостирования (опилки, стружка, рейки, древесная крошка, обломки досок, кора), содержат мало углерода, который может быть переработан микрофлорой (целлюлоза и лигнин плохо поддаются биологическому разложению). Введение этих продуктов в смесь производится в основном в целях увеличения объема и пористости осадков, а также облегчения дальнейшей транспортировки полученной массы. Отходы же, в состав которых входит много измельченной растительности, обычно содержат углеродсодержащие компоненты, легче поддающиеся биологическому разложению (например, протеины и гемицеллюлоза)

1.1.3. *Выбор углеродного носителя*

Углеродный носитель имеет несколько функций, а именно

— является агентом, увеличивающим объем массы и создающим в смеси пустоты, которые позволяют воздуху свободно проходить в массу осадков;

— служит структурирующим агентом, обеспечивающим механическую стабильность смеси, что упрощает перемещение и транспортировку осадка;

— является источником углерода: введение углерода (если он усваивается микрофлорой) устанавливает новый баланс между углеродом и азотом;

— служит агентом-наполнителем: углеродный носитель, как губка, поглощает влагу из осадков и улучшает их структуру.

Используется широкий спектр органических носителей: опилки (очень распространены), а также отходы лесозаготовок, стружки и доски, измельченная кора, солома, отходы от переработки винограда, льна, стержни от початков кукурузы и т. д.

Чтобы снизить расходы на приобретение углеродного носителя, все чаще применяются:

- повторное использование частично обезвоженного компоста;
- рекуперация путем просеивания крупных углеродных носителей для их повторного использования (стружки, кусков коры и т. д.).

Исходная влажность обезвоженных осадков определяет количество носителя, которое нужно ввести в массу: для кека, содержащего 20 % СВ, объем вносимого носителя (свежего, вторичного или компостированного продукта) должен превышать объем осадков приблизительно в три раза.

1.1.4. Созревание

После любого типа компостирования (продолжительность которого зависит от использованной технологии) перед применением компоста в сельском хозяйстве смесь необходимо стабилизировать в течение периода созревания (обычно в виде валков), составляющего от 1 до 3 мес, в течение которого компост следует время от времени переворачивать. Соотношение C/N, а также значение pH будут снижаться в результате протекания процесса нитрификации. Именно в течение этого периода начинается процесс образования гумуса (перегноя)

1.1.5. Основные способы компостирования осадков

Переворачивание компоста производится с помощью соответствующих машин. Эта процедура поможет проветрить компост и разбить уплотнения в целях восстановления пустот в хранящихся массах. В течение активной фазы компостирования механическое переворачивание позволяет обеспечить необходимую для обеззараживания температуру по всей массе компоста [см нормативы EPA (от англ.

Таблица 1

	Система	Аэрация (отсасывание или продувка)	Механическое переворачивание	Регулировка вентиляции/ температуры	Удаление запахов
Валки	Открытая	Естественная	Возможно	Нет	Нет
		Принудительная	Возможно	Возможно	Нет
	Закрытая	Принудительная	Нет	Возможно	Да
Ложбины (каналы)	Закрытая	Принудительная	Да	Да	Да
Туннели	Закрытая	Принудительная	Нет	Да	Да
Бункеры	Открытая	Принудительная	Возможно	Да	Да
	или закрытая				
Вращающиеся барабаны	Закрытая	Принудительная	Да	Да	Да
Биоконтейнеры (для биотермического компостирования)	Закрытая	Принудительная	Да	Да	Да

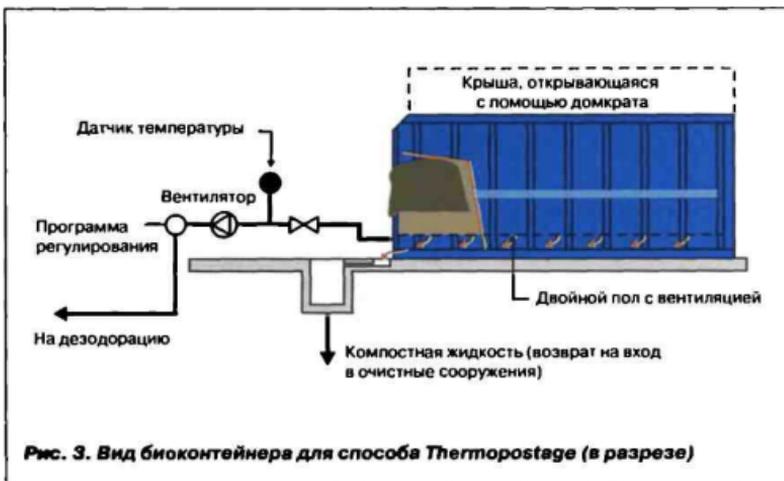
Environmental Protection Agency — Управление по охране окружающей среды) в гл. 2, п. 6.3).

Именно в так называемых закрытых системах есть возможность контролировать биологические процессы, регулируя вентиляцию в зависимости от температуры или недостатка кислорода.

Нормативные требования, ограничивающие газовые выбросы в окружающую среду, вызывают необходимость установки систем компостирования с принудительной и управляемой вентиляцией, в которых газовая фаза может легко собираться и направляться на установку химической или биологической дезодорации

1.2. Способ Thermopostage

Учитывая вышеперечисленные ограничения, компания «Дегремон» разработала способ **Thermopostage** — технологию **ускоренного компостирования в закрытых мобильных биоконтейнерах с регулируемой вентиляцией** (рис 3)



Осадки смешиваются вместе с дополнительным структурирующим продуктом для создания пористой структуры смеси. Эта процедура проводится с помощью автоматического грейфера (фото 1) Затем смесь помещается в биоконтейнеры с вытяжной вентиляцией, в которых протекают биологические термофильные реакции. Компост стабилизируется в течение 3 нед; потом происходит процесс созревания в бункерах или валках, после чего компостная масса складывается и обрабатывается на специальных площадках в зависимости от последующего использования. Установка является модульной и автоматизированной, что позволяет легко приспособить ее мощность к увеличению объема обрабатываемых масс осадков.

Закрытые биоконтейнеры надежно защищают окружающую среду от вредных выбросов. Кроме того, такая конструкция позволяет обрабатывать различные партии осадков, сохраняя информацию об их происхождении.

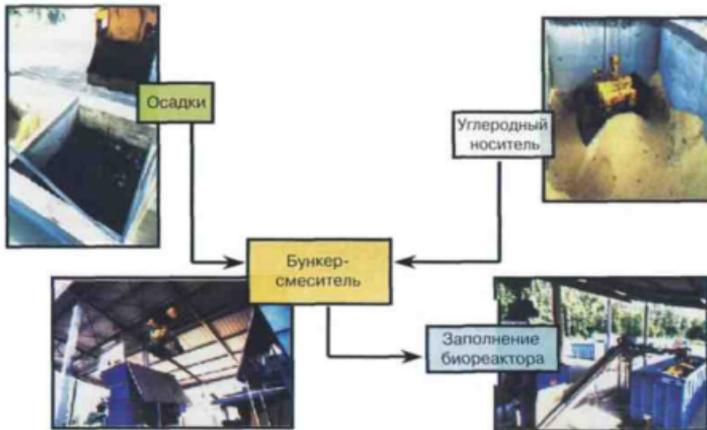


Фото 1. Способ Thermopostage: подготовка смеси осадка и вспомогательного компонента

Наконец, площадка компостирования осадков содержится в чистоте, так как осадки остаются закрытыми либо в подготовительных баках, либо в биоконтейнерах

Установка **Thermopostage** используется, например, для обработки осадков в Ревеле, Верхняя Гаронна, Франция (фото 2, 3; производительность городских очистных сооружений 12 000 ЭЖ). Она имеет следующие характеристики

- номинальная производительность установки по обезвоженному осадку от очистного сооружения продленной аэрации — 2500 т/год.
- минимальное содержание СВ в осадках — 14 %.
- предельный объем обрабатываемых осадков — 250 м³/мес.
- полезный объем биоконтейнеров — 30 м³.



Фото 2. Установка Thermopostage в г. Ревель (Верхняя Гаронна, Франция): вид биоконтейнеров с системой захвата «Ampli-Poli»



Фото 3. Установка Thermopostage в г. Ревель (Верхняя Гаронна, Франция): вид сзади системы забора воздуха, направляемого на биофильтр

- используемые вспомогательные продукты — опилки, стружки, измельченные отходы деревообработки,
- количество биоконтейнеров — 12 штук или два стандартных модуля по шесть биоконтейнеров,
- дезодорация проводится с помощью биофильтров

2. Термическая обработка обезвоженных осадков

2.1. Общие положения

Вопрос дальнейшего использования осадков, даже обезвоженных, имеет свою специфику — если раньше осадки рассматривались исключительно как конечные отходы, предназначенные для применения в сельском хозяйстве или подлежащие немедленному захоронению (см. гл. 2, п. 6.3), то сегодня ОВ, содержащиеся в осадках, активно используются не только для сельскохозяйственных нужд, но и как потенциальный источник энергии. Однако эти возможности ограничиваются присутствием в осадках целого ряда загрязняющих веществ, включая бактерии, тяжелые металлы и диоксины. Возникают постоянные проблемы, связанные с утилизацией (полезным использованием) или уничтожением осадков в соответствии с действующими нормативами, с одной стороны, и с высокой стоимостью этих работ, с другой стороны.

Обработка осадков термическим способом экономически выгодна для химической и металлургической промышленности, где особенно остро стоит проблема обработки промышленных отходов.

Жидкие осадки, даже прошедшие уплотнение, содержат невысокие количества СВ (4–8 %). Применяемые термические способы их обработки преследуют одну из целей: ускорить биологические процессы (анаэробное термофильное сбраживание, пастеризацию — см. гл. 18) либо провести глубокое окисление ОВ осадка (жидкофазное окисление — см. п. 6)

Таблица 2
Термические способы обработки осадков

<i>Термические способы</i>	<i>Жидкие осадки</i>	<i>Осадки, обезвоженные механическим способом</i>
Способы термического кондиционирования	Термическое кондиционирование Анаэробное сбраживание	Частичная или глубокая термическая сушка Сушка с помощью солнца
Способы окисления органической материи	Жидкофазное окисление под действием O и под давлением	Специальное сжигание Специальное сжигание с предварительной сушкой Совместное сжигание пиролиз, термоліз, газификация
Методы остекловывания минерального вещества	Обработка золы с помощью плавления	Обработка золы с помощью плавления Газификация с встроенной установкой остекловывания

Осадки, обезвоженные механическим способом, являются очень концентрированными по содержанию СВ (16–35 %). Применяемые термические способы их обработки преследуют три различные цели: термическое обезвоживание (частичная или глубокая сушка), частичное или полное окисление СВ без введения минеральных веществ (сжигание, газификация, термолиз, пиролиз) или глубокая термическая обработка минеральной фракции осадков с преобразованием структуры осадков (посредством остекловывания).

В табл. 2 приведен один из вариантов классификации термических способов обработки осадков.

2.2. Характеристика энергетических возможностей осадка

Потенциал энергетической утилизации осадка (использования в качестве источника энергии) определяется величиной **нижней теплоты сгорания** (НТС) исходного осадка. Это значение, в свою очередь, определяется НТС органических веществ (значение лежит в диапазоне 20 900–23 000 кДж/кг СВ), из которой необходимо вычесть теплоту конденсации воды, содержащейся в конкретном осадке.

По сравнению с другими отходами НТС осадков невысока. Например, для необработанных бытовых отходов эта величина находится в диапазоне 8500–9000 кДж/кг, в то время как для механически обезвоженных осадков (25 % СВ) ее значение составляет от 1200 до 1500 кДж/кг.

При проведении любого вида термической обработки большое значение имеют специфические загрязняющие компоненты, содержание которых регламентируется нормативными актами, относящимися к выбросам в окружающую среду. Необходимо количественно учитывать следующие загрязняющие вещества:

- галогенсодержащие (Cl, F),
- серосодержащие (S, меркаптаны, H₂S и т. п.),
- летучие тяжелые металлы (Hg, Cd, Tl),
- тяжелые металлы, которые считаются нелетучими или малолетучими (Sb, As, Pb, Cr, Cu, Co, Mn, Ni, V),
- вещества, подобные диоксину и фуранам.

2.3. Тепловой баланс

Любая установка, потребляющая или производящая энергию, работает в соответствии с тепловым балансом, который определяется по законам термодинамики и выражает равновесие между энтальпией (теппосохранением), поступающей в систему, и энтальпией, выходящей из этой системы.

Установление такого равновесия методом последовательных приближений позволяет вычислить размеры **потребления или выделения энергии системой** в зависимости от переменных параметров, а также оценить количество образующихся побочных продуктов (твердых и летучих).

Учитывают следующие виды энтальпии:

- входящая
 - экзотермические реакции, протекающие в результате окисления обрабатываемых продуктов (например, сжигание СВ, содержащихся в осадках),
 - энергии, рециркулируемые самим процессом (например, при сжигании такой энергией является энтальпия воздуха для псевдооживления),

- **энергия, выделяемая при сжигании дополнительного топлива** (количество дополнительного топлива в час на НТС этого дополнительного топлива),
- **исходящая**
- **эндотермические реакции, протекающие в системе** (при обработке осадков это скрытая теплота испарения воды, содержащейся в осадках, которые поступают в систему);
- **энтальпия (или сухое тепло) продуктов реакции**, выделяющаяся при разложении поступающих веществ, при обработке осадков эту энергию представляет главным образом перегрев испаряющейся воды и продуктов полного или частичного сгорания до температуры на выходе из системы,
- **энтальпия (или сухое тепло) продуктов реакции**, поступающая от **дополнительного топлива**, если оно требуется для восполнения баланса реакции,
- **тепловые потери системы**, рассчитываются по классическим формулам теплопередачи. В первом приближении и в упрощенной форме такие потери можно оценить приблизительно как 3 % от суммы выходящих из системы энтальпий

Баланс рассчитывается методом последовательных приближений с учетом следующих параметров

- минимальная температура на выходе системы,
- содержание свободного кислорода O_2 в газовых продуктах, выходящих из системы (при избытке воздуха)

Особый случай представляет собой сжигание или пиролиз (газификация), когда минимальная температура должна составлять 850 °С, а содержание свободного кислорода фиксируется в порядке, установленном действующими нормативными актами (они предписывают обычно содержание кислорода 6 % для сухих газов и от 3 до 3,5 % для влажных газов)

3. Сушка

3.1. Принцип работы

Необходимость применения термической сушки вызвана ограничениями механического обезвоживания (см гл 18, лп 5–7) Удаление связанной воды с **помощью испарения** требует создания градиента температур между внешней поверхностью зерен или хлопьев, составляющих осадки, и их ядром. Во время этого процесса водяной пар, образующийся в ядре, диффундирует к поверхностному слою, называемому пограничным слоем. Выделяющаяся энергия представляет собой сумму скрытой теплоты и энергии связи молекул воды (значение последней величины значительно меньше первой)

3.2. Поведение осадков во время сушки

Органические осадки обладают специфическими свойствами, которые оказывают влияние на термические процессы сушки. Свойства этих осадков зависят от содержания в них СВ (рис 4)

Довольно трудно определить диапазон значений содержания СВ для зоны 2 на рис 4, так как оно в большей мере зависит от наличия или отсутствия в осадках биологических компонентов, а также от множества других факторов, например от содержания в осадках волокон. Обычно для этой зоны содержание СВ составляет от



45 до 50 %, поскольку вязкость осадков значительно возрастает, придавая им способность к самоагломерации, что приводит к невозможности перекачивать осадки насосами и затрудняет их транспортировку

В зоне 3 осадки приобретают зернистую структуру, а размер зерен изменяется в зависимости от свойств осадка и технологии сушильного аппарата

3.3. Технологии сушки

Используемые сушильные установки являются вариантом промышленных установок, работающих в химической, фармацевтической и аграрно-пищевой отраслях промышленности. Существующие технологии адаптированы к работе с различными осадками, обладающими специфическими свойствами.

Технологии передачи тепла основываются на трех физических явлениях — теплопроводность, конвекция и излучение (см гл 8, п. 7 3 1). Существует три основных вида сушильных установок:

- **непрямые сушильные установки** — передача тепла происходит через поверхность металлического теплообменника (по принципу теплопроводности и конвекции);
- **прямые сушильные установки** — передача тепла происходит при прямом контакте жидкого (или газообразного) теплоносителя и осадка (по принципу теплопроводности);
- **смешанные сушильные установки** — совмещение двух вышеупомянутых систем: первая часть процесса протекает в зоне не прямой сушки, а вторая фаза — в зоне прямой сушки.

При проведении некоторых технологических процессов наличие массы, обладающей высокой вязкостью, делает невозможным применение сушильной установки. Во избежание такой ситуации изготовители используют интенсивную рециркуляцию высушенных продуктов в голову установки таким образом, чтобы содержание СВ в поступающих осадках превышало критический порог, т. е. составляло не менее 65 %.

Существует целый ряд сушильных установок с **внешней интенсивной рециркуляцией (от 300 до 500 % входящих СВ)**, которые могут работать по прямому и не-

Таблица 3
Классификация технологий сушки

Способ передачи тепла	Без интенсивной рециркуляции	С интенсивной рециркуляцией
Прямой	Установка Centridry (частичная сушка) Сушильная установка с горячим воздухом (включая ленточную сушилку)	Барабанные сушильные установки Кипящий (псевдооживленный) слой Сушильная установка с горячим воздухом (ленточная)
Непрямой	Установка Naratherm	Вертикальная сушильная установка Трубчатая сушилка Дисковая сушилка
Смешанный	Сушильный тонкослойный аппарат + ленточная сушилка inpodry Тонкослойный сушильный аппарат + пневмотранспорт	
Излучение (солнечное)	Установка Heliantis (частичная солнечная сушка)	

Примечание Жирным шрифтом отмечены сушильные установки, описание которых приводится в п. 3.4

прямому принципу. Проведение этапа **предварительного гранулирования** во время стадии интенсивной рециркуляции позволяет придать конечному высушенному продукту свойства гранулированного изделия, которое не требует дальнейшего кондиционирования.

Изготовителями сушильных установок была разработана и другая технология, позволяющая обрабатывать осадки с высокой вязкостью непосредственно в самом сушильном аппарате, т. е. по принципу непрямой и смешанной сушки.

3.4. Некоторые специальные технологии

3.4.1. Барабанная сушильная установка

Установка представляет собой барабан с одним или несколькими проходами. Перед барабаном располагается камера сгорания, которая позволяет разогреть воздух термического контура и снизить концентрацию O_2 за счет продуктов сгорания и водяного пара от испаряющейся воды, содержащейся в осадках (рис. 5).

Данный тип сушильных установок имеет широкий диапазон производительности от 5 до 15 т воды, испаряемой в час [см также характеристики очистных сооружений «Valenton» (в регионе Парижа), гл. 23, п. 3.2].

3.4.2. Сушильная установка *Naratherm*

Сушильная установка **Naratherm** (фото 4) представляет собой горизонтальную камеру с двойным корпусом. В камере расположены два параллельных вала, на каждом валу — большое число лопаток специфической формы (с выемками). Внут-



ри камеры вдоль валов проходит жидкий теплоноситель. Роль теплоносителя выполняет либо насыщенный сухой пар под давлением от 5 до 10 бар, либо термическое масло, нагретое до температуры 160–200 °С.

Валы вращаются с низкой скоростью в противоположных направлениях, перемешивая осадки, что обеспечивает их высокую однородность. Длительное время пре-

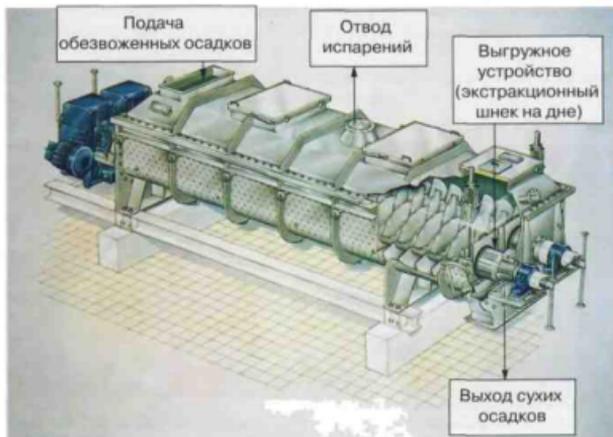


Фото 4. Сушильная установка Naratherm

бывания в камере установки (3 ч) способствует **глубокому обеззараживанию осадков, проходящих процесс сушки.**

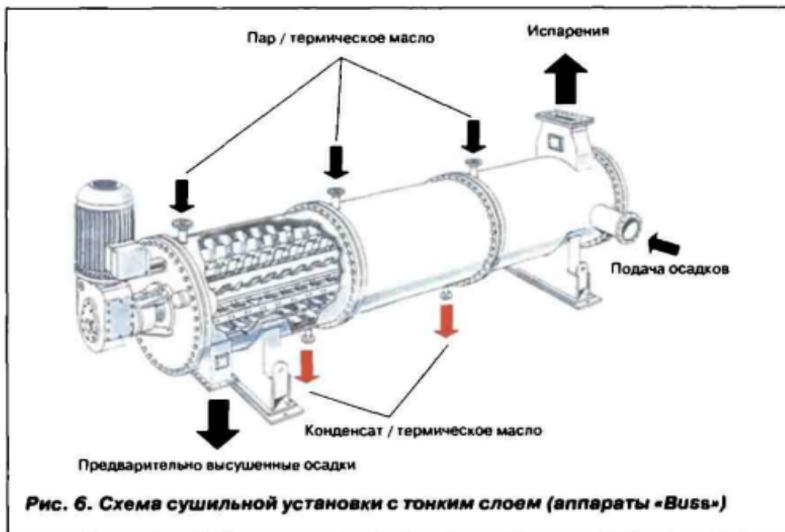
Сушильная установка **Naratherm** не требует интенсивной рециркуляции части высушенных продуктов на вход в нее, работает с осадками высокой вязкости и измельчает их для формирования смеси более мелкозернистых гранулированных продуктов. В зависимости от дальнейшего назначения высушенных осадков за ней может быть размещена установка для придания полученному осадку определенной формы (окатывание, или пеллетизация).

Сушильная установка **Naratherm** изготавливается из нержавеющей стали с напылением из карбида вольфрама (для паровой модели); для масляной модели камера также выполняется из нержавеющей стали с накладными изнашивающимися пластинами, а лопатки — из стали с высоким содержанием магния.

Сушильные установки **Naratherm** стандартного ряда имеют теплопередающую поверхность от 3 до 300 м². Для любых непрямых сушильных установок их испарительная способность зависит от типа обрабатываемых осадков (коэффициент передачи тепла будет разный для биологических осадков и первичных осадков с большим или меньшим содержанием волокон). Удельная испарительная способность изменяется в зависимости от происхождения осадков от 12 до 20 кг воды за 1 ч на 1 м². Первичные осадки будут находиться внизу этого интервала, а биологические осадки — сверху.

3.4.3. Сушильная установка с тонким слоем

Сушильная установка с тонким слоем (рис. 6) представляет собой цилиндрическую сушилку с двойными внешними стенками, между которыми циркулирует теплоноситель (обычно это термическое масло). По принципу работы аппарат является



непрямой сушильной установкой без интенсивной рециркуляции. Внутри горизонтального цилиндра расположен ротор, на сторонах которого находятся продольные стержни, поддерживающие наклонные скребки. Пространство между скребком и внутренней стенкой кожуха цилиндра определяет толщину тонкого слоя (несколько миллиметров). Скорость вращения ротора изменяется в зависимости от модели (от 80 до 450 об/мин) чем выше скорость, тем большего технического ухода требует установка из-за вибрации, истирания и т. д.

Сушильная установка с тонким слоем сама по себе не позволяет добиться высоких показателей содержания СВ в осадке, поэтому она должна быть дополнена второй ступенью сушки, которая в зависимости от разработчика будет проходить либо в режиме прямой сушки (установка «Buss»), либо по принципу непрямой сушки (установки *Innoplana* и «Vomtm»). После обработки в таких сушильных установках (за исключением установки *Innoplana*) осадки обычно подвергаются процедуре придания определенной формы сухому продукту.

3.4.4. Сушильная установка *Innodry*

Технология *Innodry* была недавно разработана компанией «Дегремон» (фото 5 и рис 7). Данная установка представляет собой сушильный аппарат смешанного типа: первая ступень сушки проходит с применением установки с тонким слоем, а вторая ступень — в ленточной сушилке с горячим воздухом.

Технологии установок *Innodry* основаны на **двух инновациях**

— между двумя ступенями сушки предварительно осушенный продукт, который обладает высокой вязкостью, легко подвергается экструзии (за счет агломерационного слипания) в виде окатышей. Полученный слой окатышей в ленточной сушилке легко проникает для горячего воздуха, и с экономической точки зрения такая сушка выгодна, поскольку не требует дальнейшего формования полученного продукта.

— испарения от первой ступени сушки конденсируются опосредованным образом, а их скрытая рекуперируемая энергия используется для нагрева контура горячего воздуха, который выполняет роль теплоносителя на второй ступени сушки.

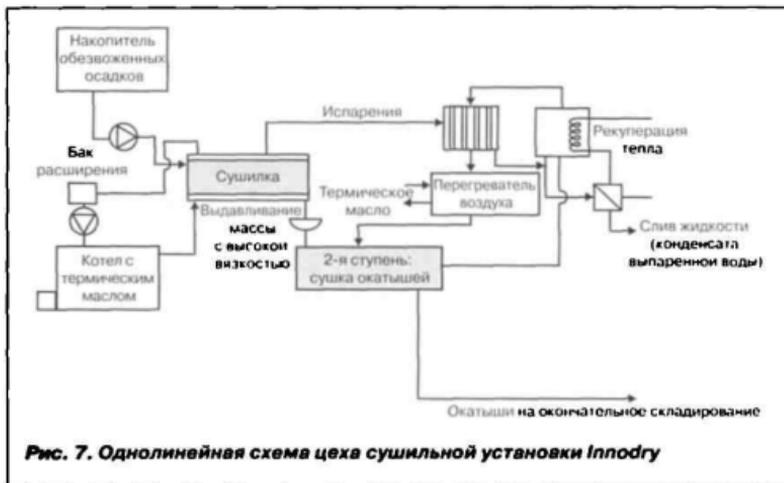
В настоящее время разработаны модели сушильных установок *Innodry* с производительностью по испаряемой влаге до 3 т/ч.



Тонкослойная сушилка (1-я ступень)

Ленточная сушилка (2-я ступень)

Фото 5. Сушильная установка *Innodry* на очистных сооружениях в г. Арендаль (Норвегия)



3.5. Концепция цеха сушилки осадков

Если выбор технологии сушилки играет важную роль для обработки осадков, то концепция цеха сушилки имеет еще большее значение, так как от грамотного инженерного решения по вспомогательным блокам и системам зависит конечный результат работы цеха

- Цех сушилки осадков включает в себя следующие вспомогательные блоки и системы
- система хранения, перемещения и транспортировки влажных, а затем высушенных осадков,
 - контур теплоносителя,
 - блок обработки испарений с рекуперацией тепла или без нее,
 - установка возможной последующей обработки высушенных осадков — окатывание,
 - помещение для складирования высушенных осадков на длительный период,
 - система общей безопасности цеха сушилки осадков.

В рамках данной книги невозможно рассмотреть все технические аспекты цеха сушилки осадков для сушильных установок рассмотренных выше типов, поэтому ограничимся вариантом цеха с сушильной установкой **Naratherm** (рис. 8), так как он почти полностью подходит к установкам другого типа. При описании некоторых систем и блоков (например, системы перемещения и транспортировки осадков) будут даны несколько советов, основанных на практическом опыте компании «Дегремон».

■ Перемещение и транспортировка обезвоженных осадков

Осадки рекомендуются перекачивать насосами (с эксцентриковым ротором и подшипниками), которые следует тщательно подбирать в зависимости от условий применения (см. гл. 18, п. 8). Осадки, поступающие от фильтр-прессов, должны предварительно подвергаться разрыхлению.

Если цех сушилки не входит в состав очистных сооружений и обрабатывает осадки различного происхождения, поставляемые в цех после длительного периода складирования и транспортировки, то перед насосами настоятельно рекомендуется уста-

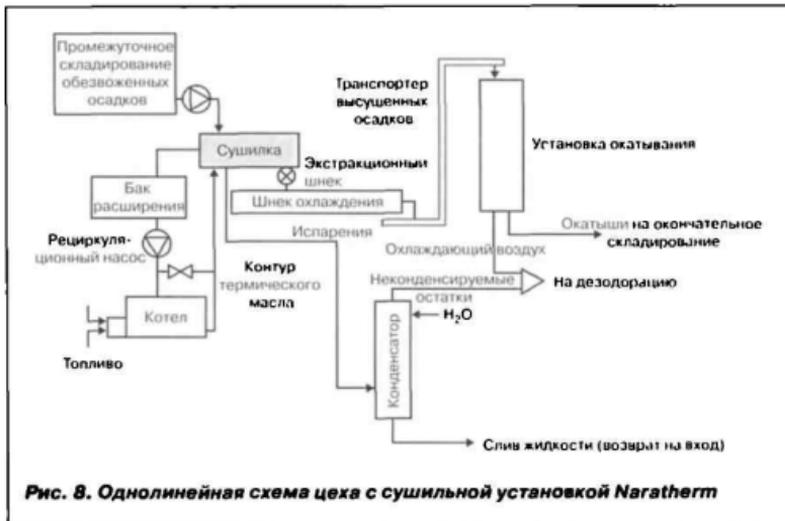


Рис. 8. Однолинейная схема цеха с сушильной установкой Naratherm

новить фильтр, отделяющий посторонние материалы, а также различные приемники осадков в зависимости от содержания в них СВ и их дальнейшего назначения.

■ Перемещение и транспортировка высушенных осадков

Система перемещения и транспортировки высушенных осадков является ключевой, так как при этих операциях гранулированная структура продукта может подвергнуться изменениям (по крайней мере, частичным), в результате которых возникают абразивные процессы. Наконец, данная система должна быть оснащена в строгом соответствии с правилами безопасности (см п 3 10)

■ Контур теплоносителя

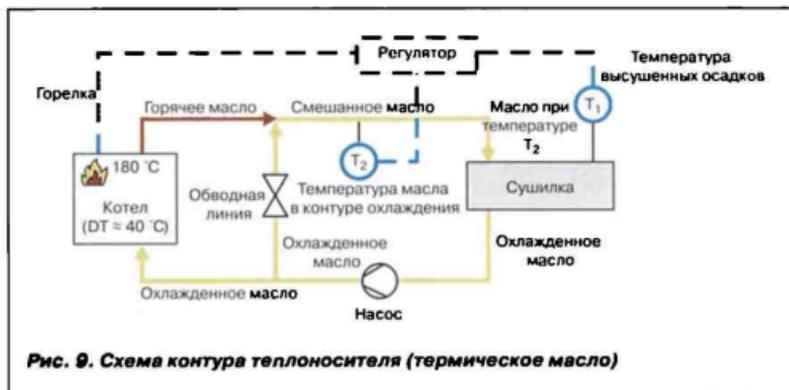
На рис 9 показана схема контура теплоносителя с термическим маслом, а на рис 10 — с одним котлом для двух параллельных сушилок (пример установок в городах Метц и Лимэ, Франция)

■ Блок обработки испарений с рекуперацией тепла или без нее

Испарения, поступающие из сушильной установки **Naratherm**, состоят из водяного пара, который дополняется воздухом, получаемым за счет понижения давления в сушилке.

При обработке неизвесткованных осадков испарения содержат пыль (от 3 до 5 г/Нм³), а также летучие вещества NH₃, S², углеродсодержащие органические вещества и т п В состав последних входят в основном альдегиды, ацетон, амины и т п Присутствие этих компонентов вызывает необходимость установки оборудования, предназначенного для уничтожения запаха

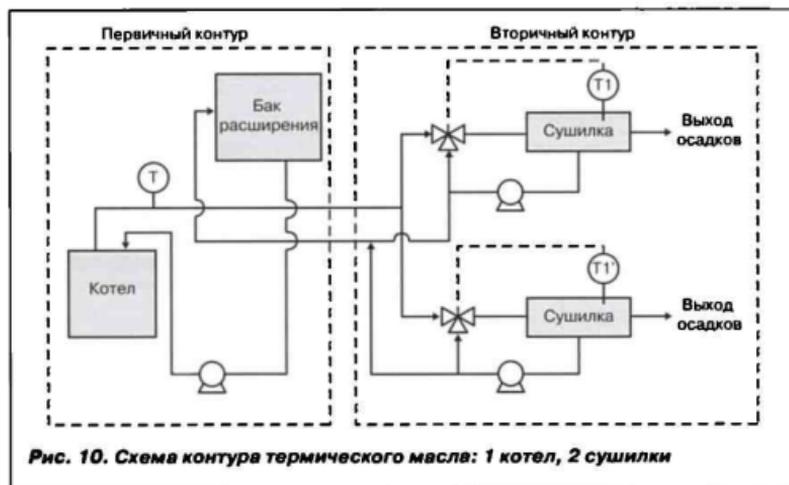
Испарения обычно обрабатываются в прямом конденсаторе. При необходимости утилизировать энергию скрытой теплоты конденсации водяного пара контур воды, установленный на конденсаторе, должен быть замкнут через теплообмен-

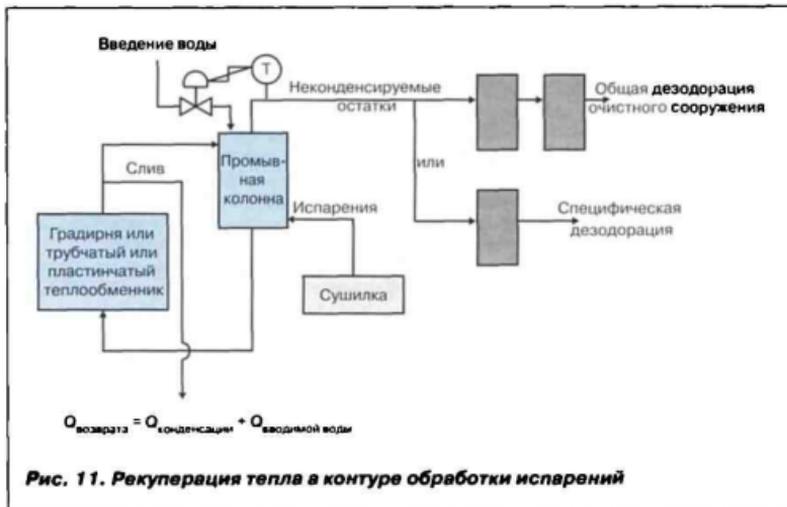


ник для передачи вторичному звену тепловой энергии с низким теплосодержанием ($80\text{--}85\text{ }^{\circ}\text{C}$) (рис. 11) Замкнутый контур должен предусматривать периодический слив конденсата с последующим его возвратом в головную часть установки. На- грузки по загрязняющим веществам в таких возвращаемых потоках указаны в табл. 4 (для неизвесткованных осадков)

■ Обработка испарений сушилок прямого типа

Выпаренная вода оказывается включенной в потоки, составляющие термический контур (избыток воздуха + продукты сгорания). Кроме того, этот «газовый» поток за счет давления перемещает полученные высушенные осадки. Таким обра-





зом, однолинейная схема обработки (см. рис 5) должна отличаться от схемы установки **Nertherm**

Необходимо отметить, что в линию обработки должны быть включены рукавный фильтр или полициклоны (сепараторы циклонного типа), чтобы очистить от пыли поток испарений

Поскольку значение относительной влажности испарений на входе в конденсатор намного ниже этой величины для установки **Nertherm**, почти невозможно получить горячую воду с температурой выше 60 °С.

■ Формование сухого продукта (окаывание)

К сожалению, существующие способы сушки не позволяют добиться достаточно высокого качества гранулирования сухого продукта, что связано как с самим процессом, так и с природой обрабатываемых осадков. Практика эксплуатации установок компании «Дегремон» показывает, что:

- биологические осадки с высоким содержанием летучих веществ легко поддаются самогранулированию;
- способность к самогранулированию постепенно снижается по мере увеличения в смешанных осадках доли первичных осадков;
- сбраживание мало влияет на способность к самогранулированию;

Таблица 4

Анализ возвратов в голову установки, кг на 1 т выпаренной воды

	С очисткой от пыли	Без очистки от пыли
ВВ	4–8	Ничтожное количество
ХПК	3–6	0,5–1
N(NH ₄)	0,5–1	Приблизительно 0,1

— наличие волокон в осадках снижает их способность к самогранулированию. Обычно предельно допустимым уровнем наличия волокон считается 5 % (определяется по сухому остатку после просеивания обезвоженных осадков на ситах с размером ячеек 500 мкм).

Если конструкция сушильной установки не предполагает самогранулирования полученных осадков, то их обрабатывают в цехе формирования сухого продукта. Наиболее распространенной технологией является окатывание, которое заключается в экструзии (выдавливании) предварительно высушенного продукта через фильеру. Фильера имеет диаметр от 5 до 8 мм. Полученные экструдированные гранулы называются окатышами (рис. 12).

В целях безопасности перед окончательным складированием на короткий или длительный период **окатыши охлаждают**. Температура охлаждения обязательно должна быть ниже 45 °С (см. гл. 3, п. 10).

Окатыши должны проходить контроль качества по следующим характеристикам — **гранулометрический состав**. Обычно существуют строгие ограничения по количеству мелкой фракции. Мелкой фракцией считают количество продукта, размер частиц которого меньше отверстий сита, соответствующего диаметру отверстия фильеры. Обычно допустимым содержанием мелкой фракции считается 2 %.



Рис. 12. Установка окатывания

- **содержание пыли** Необходимо отметить, что часто в технических требованиях указывается, что порог отсеивания должен составлять 63 мкм, а весовая доля пыли не должна превышать 0,1 % проходящего продукта. Однако измерение и гарантированное подтверждение такого порогового значения представляется довольно затруднительным. Поэтому компания «Дегремон» рекомендует установить предельное значение на уровне 300 мкм с весовой долей пыли, не превышающей 1 %.
 - **твердость**, которая представляет собой сопротивление раздавливанию и измеряется с помощью стандартной методики, называемой тестом Каля (Khal). Сопротивление на раздавливание должно превышать 30 Н.
 - **долговечность (ломкость)**, определяется с помощью стандартного теста Холмена (Holmen). Результат этого теста должен быть выше 90 %.
- Примечание* Процесс окатыwania имеет серьезные ограничения, связанные с абразивным истиранием используемого оборудования

3.6. Потребление энергии цехом сушки осадков

Тепловой баланс работы цеха сушки осадков рассчитывается довольно легко. С его помощью можно определить энергию, требуемую для выпаривания воды и увеличения температуры сухого вещества и поставляемую теплоносителем. С помощью теплового баланса можно получить суммарное значение энергии, потребляемой цехом сушки. Оно также будет зависеть от общей производительности котельной установки, обеспечивающей нагрев теплоносителя.

Конкретный пример теплового баланса для сушильной установки **Naratherm** можно представить следующим образом (табл. 5). По данному балансу получается, что 80 % энергии расходуется на испарение воды, что теоретически подразумевает возможность вторичного использования всей этой энергии при конденсации испарений, но поскольку конденсация происходит при низких температурах, то рекуперация энергии становится маловероятной (за исключением случая использования установки **Innodry**).

Обобщая, можно сказать, что потребление тепловой энергии цехом сушки осадков будет следующим:

Таблица 5

Термический баланс для сушильной установки Naratherm на 1 кг выпаренной воды за 1 ч (для осадков с исходным содержанием сухих веществ 20 %, высушенных до 90 %), кДж

Нагрев осадков до 100 °С	380
Испарение воды	2260
Перегрев выпаренной воды	20
Перегрев воздуха	30
Перегрев высушенных осадков	50
Потери тепла	80
Итого	2820 или (675 ккал)

или приблизительно 3150 кДж, включая энергию, производимую котельной (нагревательным котлом)

- для не прямых сушильных установок (способ **Naratherm**) — от 3135 до 3350 кДж на 1 кг выпаренной воды,
- для прямых сушильных установок — от 3350 до 3750 кДж на 1 кг выпаренной воды,
- для смешанных сушильных установок (кроме способа **Innodry**) — от 3550 до 3970 кДж на 1 кг выпаренной воды

Цех сушки осадков по способу **Innodry** с помощью **частичной рекуперации скрытой теплоты испарения воды** позволяет добиться самых высоких результатов работы, так как значения потребляемой энергии будут составлять от 2350 до 2600 кДж на 1 кг выпаренной воды

Что касается потребления электрической энергии цехом сушки осадков, то оно для разных установок сушки практически одинаково, однако зависит от того, будет ли конечный продукт подвергаться последующему окатыванию или нет

- 60–65 кВт ч на 1 т выпаренной воды без блока окатывания,
- 100–110 кВт ч на 1 т выпаренной воды с блоком окатывания

3.7. Эксплуатация цеха сушки осадков

Настоятельно рекомендуется организовать работу цеха сушки осадков в непрерывном режиме, в крайнем случае можно ограничиться непрерывным периодом в 5 дней. Для цехов с высокой испарительной мощностью (выше 3 т/ч) представляется целесообразным предусмотреть непрерывную работу цеха из расчета 7500 ч эффективной работы в год.

Организация работы цеха будет происходить по-разному, в зависимости от того, рассчитан ли он на установку блока окатывания или нет. Если в этом нет необходимости, то цех сушки осадков может быть полностью автоматизирован, что не требует постоянного присутствия оператора, особенно в ночную смену. В этом случае должна быть установлена эффективная контрольная система, подобная работающим в цехах по способам сушки **Naratherm** и **Innodry**.

Однако и при наличии блока окатывания цех сушки осадков может работать в непрерывном режиме, если соответствующая установка обладает повышенной мощностью для того, чтобы работать только в присутствии оператора (например, в дневную смену). При этом в состав цеха сушки должно входить помещение для промежуточного хранения высушенных продуктов, ожидающих окатывания.

Но даже если установка окатывания имеет 100%-й запас мощности и размещена непосредственно после линии сушки, ее работу не рекомендуется оставлять без постоянного контроля операторами. Это замечание относится также к цехам сушки с интенсивной рециркуляцией.

3.8. Сушка осадков до умеренного содержания сухого вещества

Цехи сушки, описанные выше, разработаны с расчетом, что содержание СВ в конечном продукте будет составлять не менее 90 % (т. е. влажность конечного продукта не более 10 %). Но в отдельных случаях требуется получить продукты с более низким содержанием СВ (обычно около 65 %). Подобные высушенные осадки имеют такое же значение НТС, как у бытовых отходов.

В настоящее время сооружения для обработки осадков разрабатываются одновременно с проектированием новых заводов UJOM (от фр. *Unité d'Incinération d'Ordures Ménagères* — завод по сжиганию бытовых отходов), которые строятся в

рамках программ департаментов Франции по уничтожению отходов. В этом случае в производственной линии завода UIOM необходимо предусматривать установку печи сжигания повышенной мощности.

Из вышеописанных установок умеренные значения содержания СВ в обработанных осадках обеспечивают сушильные установки **Innodry**, а также сушилки смешанного типа и сушилки с горячим воздухом (ленточные). Другие типы сушилок позволяют получить содержание СВ 65 % только после смешивания высушенных на 90 % осадков с просто обезвоженными осадками, что зачастую вызывает трудности при транспортировке и использовании.

3.8.1. Цех сушки по способу Centridry

Centridry — это способ сушки осадков, по которому в одной установке объединяются механическое обезвоживание (центрифугированием) и термическая сушка (рис. 13).



Вокруг классического корпуса центрифуги располагается статическая камера, из которой обезвоженные осадки выдавливаются сквозь выходные отверстия корпуса и диспергируются прямо в потоке горячего воздуха. Этот поток увлекает осадки в трубопровод, где процесс сушки продолжается. На конце трубопровода (протяженность которого может быть от 30 до 40 м) установлен сепаратор циклонного типа, который отделяет частично высушенную твердую фазу от горячего воздуха.

Так же как и в описанных выше барабанных сушилках, горячий воздух сначала освобождается от испаряющейся воды в прямом конденсаторе, а затем рециркулирует в термический генератор, где он снова нагревается и перемешивается с про-

дуктами сгорания, поступающими от горелки, установленной на фронтальной части генератора. Сформированный таким образом закрытый контур характеризуется низким содержанием кислорода и непрерывной продувкой в объеме, эквивалентном объему выпаренной воды и продуктов сгорания.

В целях безопасности (из-за риска пиролиза) не рекомендуется использовать способ **Centridry** для глубокой 90%-й сушки. Его можно дополнить введением известки в осадок, что после высушивания смеси и ее окатывания позволяет получить продукт, который можно применять в сельском хозяйстве или отправлять на длительное хранение без дополнительного кондиционирования (например, установка «Etampes» мощностью 700 кг/ч выпаренной воды).

3.8.2. Способ сушки *Hellantis* с использованием солнечной энергии

3.8.2.1. Принцип парникового эффекта

Энергия, которую несет солнечное излучение, во Франции изменяется от 1200 до 1750 кВт ч/м² в год. Из этой энергии 40 % лежит в видимой области спектра, а 50 % — в инфракрасной. Парниковый эффект основан на том, что материалы (стекло, плексиглас, пленки, поликарбонаты и др.), уже давно используемые изготовителями парников, обладают особыми спектральными свойствами: они пропускают солнечное излучение, но поглощают инфракрасное излучение (рис. 14).

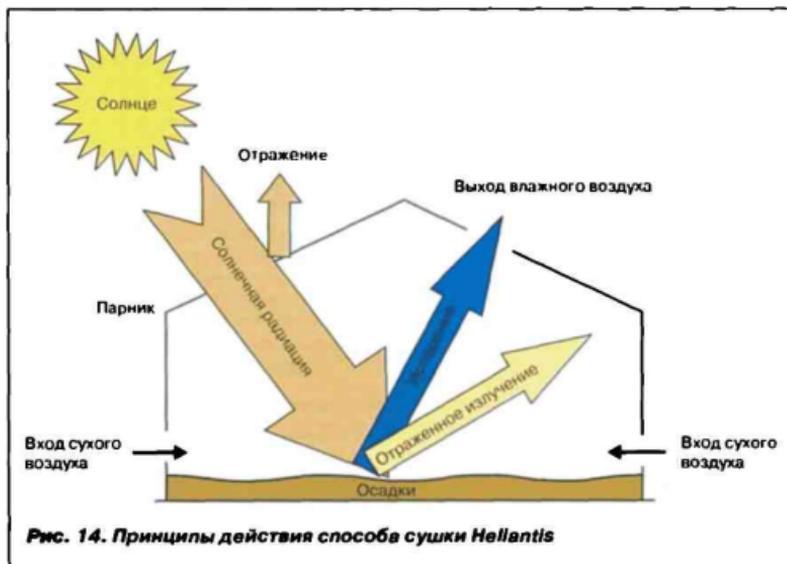


Рис. 14. Принципы действия способа сушки *Hellantis*

3.8.2.2. Промышленное применение

В установке *Hellantis*, имеющей вид парника, используется широко известный принцип парникового эффекта с целью ускорить процесс удаления воды из обезво-



Фото 6. Гранулированные осадки, произведенные в парнике Hellantis

— **постепенно перемещать** высыхающие осадки вдоль парника без других механических устройств

С помощью установки **Hellantis** во Франции можно обеспечивать выпаривание от 600 до 1200 кг воды на 1 м² в год в зависимости от региона

Скорость продвижения рыхлителя, скорость вращения его вала и глубину проникновения лопаток в слой осадка можно регулировать. **Работа этой машины автоматизирована** и не требует постоянного наблюдения

Парники **Hellantis** производят высушенные осадки в виде **гранул** размером от 1 до 4 см (фото 6), которые легко **перемещать, хранить и вносить в почву** в качестве удобрений. Содержание в них сухого вещества **превышает 70 %**

В случае необходимости парник может быть дополнен зоной складирования, в которой высушенные осадки будут храниться в течение периода, оптимального для их последующего использования в сельском хозяйстве. Внесение таких удобрений в почву не вызывает больших затруднений

Как и прочие высушенные продукты, такие осадки можно сжигать совместно с другими отходами



Фото 7. Рыхлитель, работающий в парнике Hellantis (Сарганс, Швейцария)

3.8.3. Расчет парника *Heliantis*

Расчет площади парника, необходимой для обработки полученных осадков, зависит от следующих параметров

- среднемесячные метеорологические данные, зарегистрированные на месте размещения парника (солнечное излучение, гидрометрические данные, температура): для испарения определенного количества воды в зимний период с пониженным солнечным излучением необходимо несколько недель, а летом — всего лишь несколько дней,
- местные особенности (наличие зданий, деревьев, особенности рельефа и др.)



Фото 8. Парник *Heliantis* в г. Ренье (Верхняя Савойя, Франция): 1 парник размером 120 м², рыхлитель поднят. Производительность 320 т сухого вещества в год

3.9. Сушка и когенерация

Установки сушки осадков могут быть включены в состав цехов когенерации (совместного производства тепловой и электрической энергии) с использованием термической энергии, которая поступает от газовых двигателей или газовых турбин. Ниже (см. также рис. 16) приведены важные параметры и общие правила работы цехов такого типа

- Основные характеристики, отличающие газовую турбину от газового двигателя
- продукты сгорания, исходящие от газового двигателя, обычно имеют более низкие температурные показатели, чем эти же величины для газовых турбин. Однако в обоих случаях можно обеспечить значительную утилизацию энергии (в котельной установке).

— газовый двигатель рассеивает значительную часть поступающей энергии (от 20 до 25 %) в виде горячей воды, которая может быть эффективно использована, если сбрасывание осадков проводится на той же площадке, что и их сушка. При этом весь полученный биогаз может применяться в качестве топлива для двигателя



ля. Однако необходимо напомнить, что сушка и сама по себе может производить низкокалорийную энергию, которой достаточно для проведения сбраживания. Таким образом, из-за существующего избытка энергии общая рентабельность будет снижена, если он не будет использован для обогрева зданий.

— с экономической точки зрения газовые двигатели лучше всего подходят к установкам с малым и средним энергопотреблением, а газовые турбины — к установкам с большими мощностями.

Если биогаз используется как единственный или частичный источник энергии, необходимо его предварительно высушить и освободить от серы (и от пыли), чтобы избежать проблем с возникновением кислотной коррозии и абразивных процессов в контуре когенерации.

Нередко целесообразность проведения когенерации зависит не от технических, а от экономических параметров. В этом случае многое определяет тип проекта, затраты на производство первичной энергии и выгода от получаемой в процессе производства электрической энергии. Решение о целесообразности когенерации должно приниматься отдельно в каждом конкретном случае и зависит от финансирования, а также от того, производится ли «зеленая» или возобновляемая энергия.

3.10. Безопасность цехов сушки осадков

Цех сушки осадков должен функционировать в условиях соблюдения соответствующих правил безопасности, так как в нем скрыты потенциальные риски, которые возрастают при появлении определенных сбоев в работе. Нижеприведенный перечень не исчерпывает всех рисков, связанных с установками сушки осадков.

- риски, связанные со способностью сухих продуктов самопроизвольно нагреваться,
- риски при производстве пиролизного газа (CO , CH_4 и т. п.), которые связаны либо с явлением самопроизвольного нагрева, либо с некоторыми сбоями термического характера, возникающими при прямом пиролизе.

— риски взрывов, которые могут иметь различную природу и вызывать кумулятивный эффект

- взрывы, вызываемые концентрацией в атмосфере пыли и кислорода,
- самовозгорание, вызываемое концентрацией газов CO и O₂.

— риски, связанные с искрением (статическое электричество)

В силу этих причин любой цех сушки осадков должен стать предметом **тщательного изучения в целях выявления опасностей и рисков** в соответствии с классификацией, указанной в нормативных документах. Такие работы должны проводиться с привлечением квалифицированных специалистов

Параметры безопасности изначально должны входить в проектные и инженерные расчеты цехов сушки. Кроме того, они должны учитываться при функциональном анализе и применяться согласно правилам работы автоматических устройств. Персонал, осуществляющий обслуживание, должен пройти соответствующее обучение для получения информации о существующих рисках и применяемых мерах безопасности

Настоящий «Справочник» не предназначен для подробного изложения проблемы безопасности цехов сушки осадков, но нам показалось необходимым отметить ниже самые важные моменты

3.10.1. Самопроизвольный нагрев высушенных осадков

Самопроизвольный нагрев является результатом экзотермических реакций окисления высушенных осадков, энергия которых плохо рассеивается из-за недостаточной теплопроводности их в заданном объеме. Это явление выражается в том, что внутри массы высушенных осадков, которые считаются стабильными, поднимается температура, а после преодоления определенного порогового значения начинается процесс пиролиза

Температуры самопроизвольного нагрева определяются экспериментальным путем в термостатическом шкафу на откалиброванных (в форме кубиков) объемах высушенных осадков. Таким образом, критическая температура самопроизвольного нагрева (рис. 17) определяется в зависимости от объема осадков

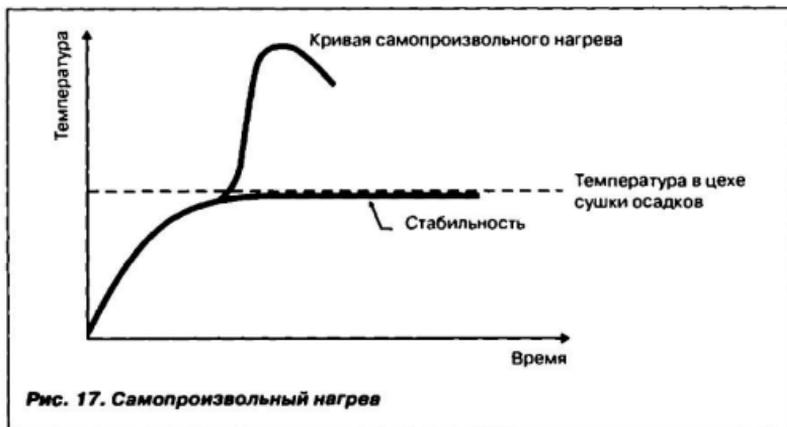
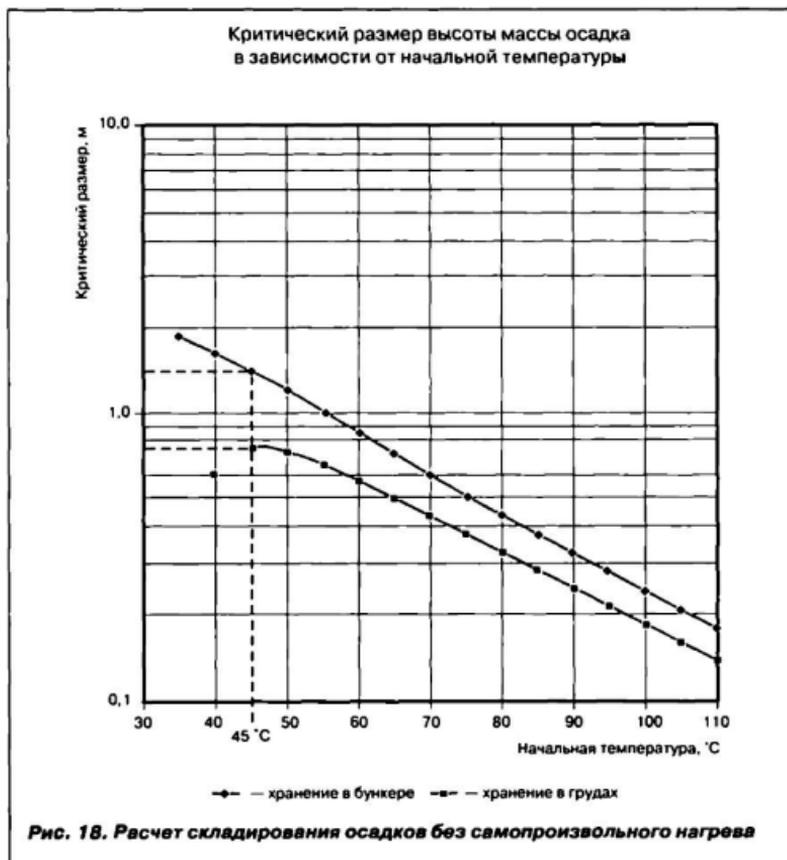


Рис. 17. Самопроизвольный нагрев



Экспериментальные данные, полученные для различных типов осадков с различным гранулометрическим составом, позволяют построить характеристические кривые, которые можно использовать при проектировании сооружений для хранения и складирования высушенных продуктов (рис. 18). Настоятельно не рекомендуется проектировать сушильные установки без учета данных, полученных на основе характеристических кривых осадков, подлежащих обработке.

3.10.2. Основные характеристики пыли высушенных осадков

Основные характеристики пыли, которые необходимо учитывать для обеспечения безопасности цеха сушки осадков, а также их стандартные значения (табл. 6) должны быть известны (по измерениям, произведенным на существующих осадках, либо по аналогии) на момент проектирования такого цеха.

Таблица 6
Характеристики пыли, связанные с обеспечением безопасности
высушенных осадков

Характеристика	Значение
Температура возгорания 5-миллиметрового слоя на горячей поверхности, °С	230
Максимальное давление, образующееся в результате воспламенения, бар	8
Константа риска вспышки K_{st} , бар м/с	100
Минимальная взрывоопасная концентрация, г/м ³	60
Предельная концентрация кислорода, %	16
Температура самовозгорания в газовом облаке, °С	360
Минимальная энергия возгорания, мДж	490

3.10.3. Инженерные решения для обеспечения безопасности цеха сушки

Любая установка по временному хранению (длительному или краткосрочному) должна быть спроектирована в соответствии с характеристическими кривыми по самопроизвольному нагреву осадков, все хранилища должны быть снабжены вентиляционными отдушинами, размер которых рассчитывают с учетом константы риска вспышки K_{st} высушенного обработанного осадка. Кроме того, отдушину оснащают системой газоподавления (N_2 или CO_2), которая активизируется при достижении определенной концентрации O_2 в газовом облаке хранилища, и детекторами газа CO (индикаторами прохождения пиролиза).

Контур (граница окружности) паров, исходящих от не прямых сушилок, а также контуры теплоносителей прямых сушилок должны иметь прибор измерения концентрации кислорода. Рекомендуется также установить датчики концентрации CO .

В зависимости от типа и конструкции механизма для транспортировки и перемещения осадков, а также от рисков искрообразования необходимо предусмотреть установку, подавляющую воспламенение (например, для обеспечения безопасности ковшовых элеваторов).

В зависимости от типа оборудования и вида рисков воспламенения необходимо установить соответствующим образом изоляционные заслонки, чтобы первый взрыв не смог бы повлечь за собой второй с еще большей мощностью (например, изоляция рукавных фильтров).

Естественно, установка таких устройств требует дополнительных производственных и эксплуатационных затрат, тем не менее она необходима.

4. Термические методы разложения органических веществ осадков

4.1. Общие положения

Термические методы разложения ОБ осадков весьма разнообразны. Поэтому ограничимся описанием наиболее распространенных из них.

Множество видов классификации таких методов связано с техническими различиями, а также с разными направлениями развития, которые находят в результате промышленного маркетинга

По мнению компании «Дегремон», начальная классификация должна учитывать в первую очередь давление, т. е. различие процессов разложения ОВ под давлением и процессов, протекающих при атмосферном давлении (табл. 7)

Таблица 7
Классификация методов разложения ОВ осадков
в соответствии с давлением

Под давлением	Атмосферное давление
Жидкофазное окисление	Совместное сжигание с другими отходами Специальное сжигание
Газификация под давлением	Газификация пиролиз, термолиз

В данной главе намеренно не затрагивается вопрос газификации под давлением, поскольку ее нельзя отнести к технологиям, применяемым только при обработке осадков. Такая газификация использовалась лишь несколько раз для обработки смесей (осадков с другими отходами). Поэтому ниже будет описано только жидкофазное окисление (см. п. 6).

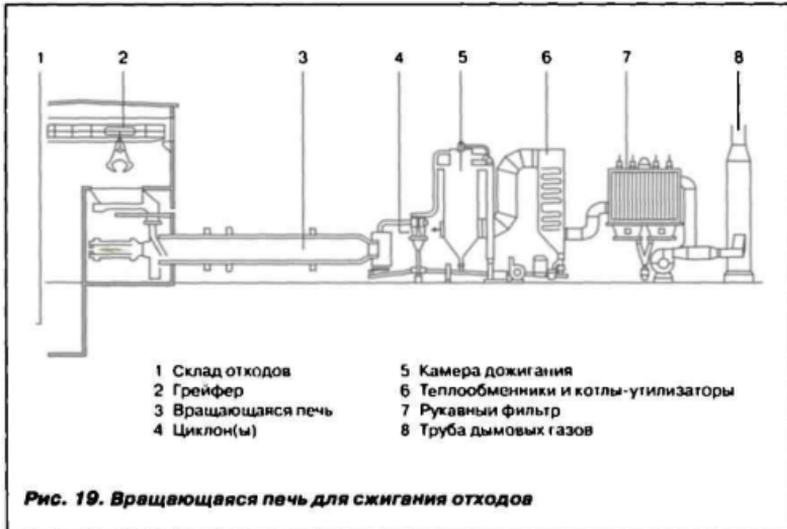
Все технологии, реализуемые при атмосферном давлении, основаны на принципе разрушения связей ОВ за счет увеличения температуры и парциального давления свободного кислорода O_2 . При высоком парциальном давлении свободного кислорода O_2 (около 6 %, что соответствует избытку воздуха 40 %) можно говорить о традиционном сжигании либо только осадков (в особых условиях), либо осадков с другими продуктами (при совместном сжигании с бытовыми отходами и специальными промышленными отходами либо в печах цементных заводов или теплостанций).

При парциальном давлении свободного кислорода O_2 , близком к нулю, речь может идти о технологиях газификации, которые в зависимости от способа проведения называются либо пиролизом, либо термолизом (см. п. 4.3). При пиролизе и термолизе ОВ не окисляются, а «разламываются» с выделением восстанавливающих газов (называемых синтез-газами или синтетическими газами) CO , CH_4 , C_nH_m и т. п. Заметим, что загрязняющие вещества (тяжелые металлы, NO_x) распределяются между различными фазами по-разному, в зависимости от температурного профиля.

Известны специальные технологии сжигания или термического разложения, которые применяются в различных областях промышленности вот уже несколько десятилетий. Эти методы отличаются друг от друга технологиями основного реактора (печи).

■ Вращающаяся печь

Печь (рис. 19) представляет собой вращающийся барабан с огнеупорным покрытием, после которого обычно устанавливается вертикальная форсажная камера (камера дожигания) в том случае, если печь предназначена для обработки отходов.



Самая известная печь такого типа — это печь для обжига цемента, также используемая для изготовления извести. Ее принцип работы применялся и при обработке отходов, прежде всего гетерогенных и/или специальных, с обязательным последующим дожиганием с целью обеспечить полное сгорание и соблюдение норм по температурным выбросам. Вращающаяся печь плохо приспособлена для обработки осадков очистных сооружений из-за невозможности контролировать избыточный воздух (что влияет на тепловой баланс), а также в связи с их высокой вязкостью, о которой говорилось выше (см п 3 2, рис 4). Высокая вязкость осадков вызывает агломерационные явления, что сильно затрудняет работу установки.

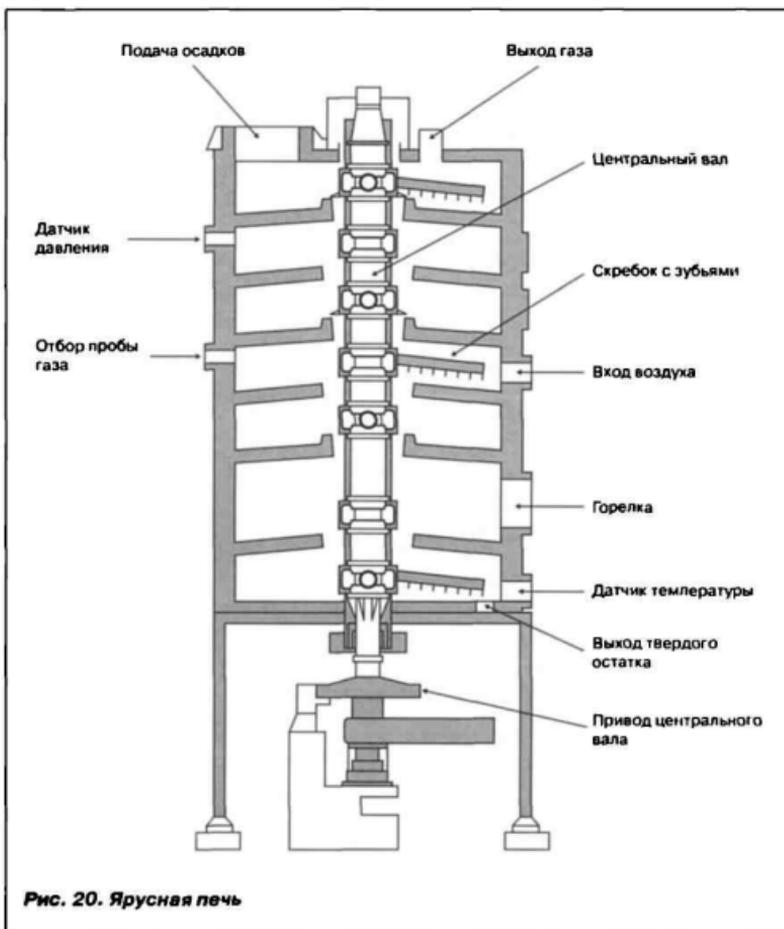
■ Печь с решеткой

Печи с решеткой обычно предназначены для обработки бытовых отходов. Тем не менее осадки могут быть подвергнуты совместному сжиганию с бытовыми отходами в таких печах либо в предварительно высушенном виде (см п 3 8), либо просто обезвоженными (см способ IC 850, п. 4 4).

■ Ярусная, или многоподовая сжигательная, печь

Ярусная печь (рис 20) была изобретена более века назад и широко использовалась в США в 60-х гг. для прямого сжигания осадков очистных сооружений. Затем ее стали применять в Европе, и в частности во Франции. Дальнейшее распространение таких печей было затруднено из-за нефтяных кризисов, которые следовали один за другим. Некоторые печи со встроенной камерой дожигания функционируют до сих пор (например, в г. Болонья, Италия).

Данная технология находит новое применение в области обработки осадков, но теперь она используется уже не для прямого сжигания, а в более совершенных способах газификации осадков (см п 4 3).



■ Печь с псевдоожиженным слоем

Печь с псевдоожиженным слоем также известна уже давно: вначале она применялась для газификации угля, а затем в основном использовалась для обжига минералов. Компания «Dorr Oliver» была главным разработчиком данной технологии. Сжигать осадки в печах с псевдоожиженным слоем начали в 70-х гг. в Европе, затем это широко вошло в практику и на сегодняшний день представляет **свмый используемый способ прямого сжигания** обезвоженных осадков. Существуют различные примеры внедрения этой технологии. Ниже будет рассмотрена лишь одна подобная технология сжигания осадков.

4.2. Сжигание в псевдоожигенном слое: печь Thermylis-НТФВ компании «Дегремон»

4.2.1. Расчет печи

Для составления теплового баланса печи **Thermylis-НТФВ** необходимы следующие базовые данные

- массовый расход осадков, подлежащих обработке, кг/ч,
- содержание СВ в обрабатываемых осадках, %,
- содержание ОВ в обрабатываемых осадках, %,
- НТС органических веществ, кДж/кг ОВ, если эта величина неизвестна, то ее можно рассчитать в соответствии с данными элементного анализа ОВ (С, Н, О, N, S), например, по формуле Дюлонга-Пети (Dulong-Petit)

ВТС, ккал/кг ОВ = $81,3С + 345,5(Н - О/8) + 22,2S$ и НТС, ккал/кг ОВ = ВТС – 54Н,

где

ВТС — высшая теплотворная способность,

С, Н, О, S — процентные содержания углерода, водорода, кислорода и серы в ОВ соответственно

При расчете теплового баланса необходимо учесть следующие основные параметры (физические и нормативные)

- температура слоя минимум 800 °С,
- температура на верху зоны расширения. 850 °С,
- время удерживания в зоне расширения минимум 5 с,
- скорость псевдоожигения на решетке: 0,9 м/с,
- скорость псевдоожигения на верху слоя: 0,85 м/с,
- скорость потока продуктов сгорания на верху зоны расширения 0,65 м/с;
- высота слоя песка при расширении. приблизительно 1,5 м,
- содержание свободного кислорода O₂ в дымовых газах > 6 % в сухом газе,
- температура воздуха для псевдоожигения в воздушной камере: не выше 650 °С.

На основании этих данных составляется тепловой баланс, по которому определяют в соответствующем порядке

- расход воздуха, необходимый для окисления поступающих ОВ (включая избыток 40 %) Он должен учитывать требуемую скорость псевдоожигения, а также поправки значений температур и давления для уровня решетки. Величина расхода определяет внутреннее сечение решетки и, следовательно, внутренний диаметр печи на уровне решетки,
- термическое равновесие, рассчитываемое методом итераций (учитывает температуру воздуха псевдоожигения, концентрацию кислорода, температуру 850 °С в области расширения) Оно определяет
 - потребность в дополнительном топливе,
 - состав продуктов сгорания,
 - профиль температур,
 - основные размеры печи,
 - основные характеристики теплообменника, нагревающего воздух псевдоожигения за счет сухого тепла дымовых газов

4.2.2. Тепловой баланс

Расчет такого баланса проводится с помощью специального программного обеспечения в соответствии с приведенными ниже основными уравнениями.

Тепловой баланс

$$Q_{AB} + Q_{AF\ b\cdot g} + Q_{S(n)} + Q_{n\cdot g} + Q_{Comb\ b\cdot g} + Q_{Ca} + Q_{AF\ Ca} = \\ = Q_{Cendres} + Q_{gaz\ sorte\ b\cdot g} + Q_{gaz\ sorte\ Ca} + Q_{S(3)} + Q_{perles}$$

При этом величины на **входе** обозначаются следующим образом

- Q_{AB} — количество тепла, принесенное продувочным воздухом (воздух, предназначенный для охлаждения частей, которые подвергаются значительному нагреванию: трубки инъекции воды, дополнительного топлива, осадков и т. д.);
- $Q_{AF\ b\cdot g}$ — количество тепла, принесенное воздухом псевдооживления, необходимое для сжигания ОВ (за вычетом промывочного воздуха);
- $Q_{S(n)}$ — количество тепла, поступающего с песком, который предназначен компенсировать абразивный износ (трение);
- $Q_{n\cdot g}$ — количество сухого тепла, приносимого поступающими продуктами;
- $Q_{Comb\ b\cdot g}$ — количество тепла, поступающего за счет полного сгорания ОВ;
- Q_{Ca} — количество тепла от сгорания дополнительного топлива;
- $Q_{AF\ Ca}$ — количество тепла, поступающего от воздуха псевдооживления, необходимое для сгорания дополнительного топлива (которое добавляется к воздуху псевдооживления)

Величины на **выходе** обозначаются следующим образом

- $Q_{Cendres}$ — сухое тепло, уносимое золой;
- $Q_{gaz\ sorte\ b\cdot g}$ — сухое тепло дымовых газов, образующихся в результате сгорания ОВ (включая избыток воздуха);
- $Q_{gaz\ sorte\ Ca}$ — сухое тепло дымовых газов, образующихся в результате сгорания дополнительного топлива.

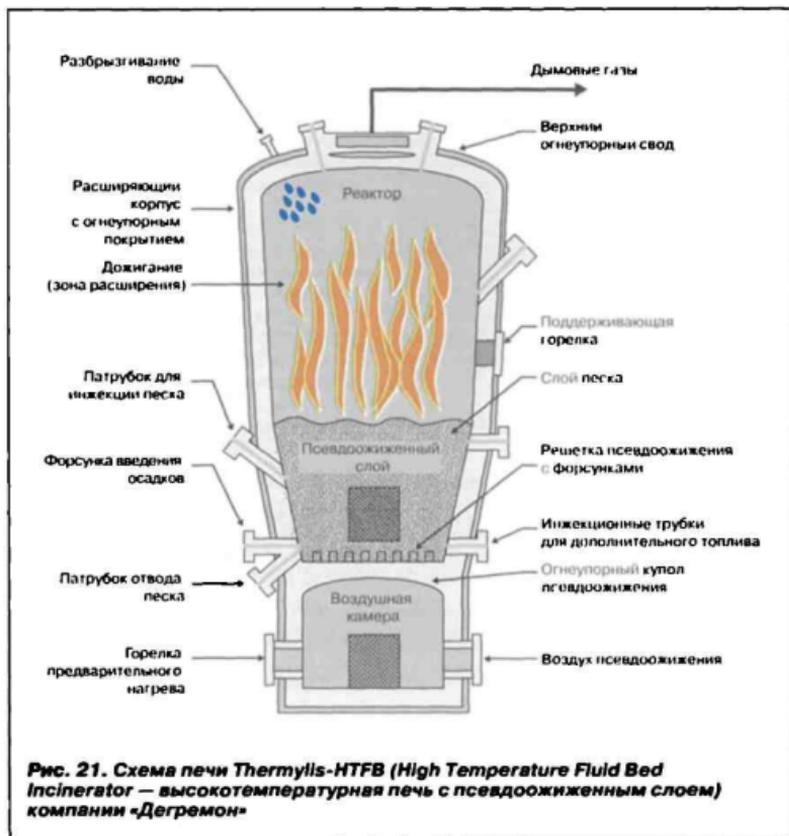
Таблица 8

Тепловой баланс печи с псевдооживленным слоем

Пример: горячая печь обрабатывает в час 1 т осадков с содержанием сухого вещества 26,2 % и с содержанием летучих веществ 65 % от сухого вещества (автотермичный режим)

	Расход, кг/ч	Тепло, кВт ч/ч	Примечания
На входе			
Воздух 650 °С	7900	1330	Рекуперированное тепло от дымовых выходящих газов (ограничено камерой горячего воздуха)
ОВ осадков	3800	4100	
Жиры	209	590	
Итого		6020	
На выходе			
Дымовые газы при 850 °С	11 575		Дымовые газы при температуре 565 °С до вторичного охлаждения и обработки
Продукты сгорания		3250	
Избыток воздуха (40 %)		530	
Скрытая теплота испарения воды		2040	
Зола		80	
Тепловые потери	357	116	
Песок	13	4	
Итого		6020	

Примечание: Из осадков с содержанием 22 % СВ выделится на 740 л/ч воды больше, что потребует приблизительно 65 л/ч топлива!



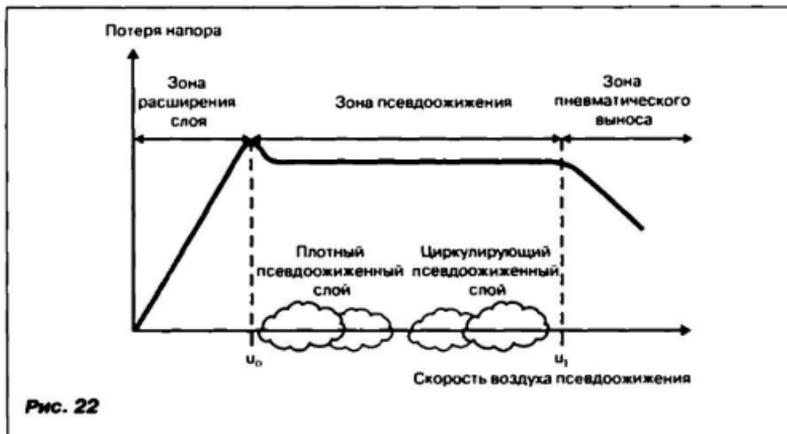
— Q_{qst} — сухое тепло частиц песка, уносимых дымовыми газами;

— $Q_{детек}$ — тепловые потери

В табл. 8 приведен упрощенный термический баланс в применении к обезвоженным осадкам. Из него видна важность предварительного нагрева воздуха, с которым в печь поступает приблизительно 22 % тепла. Также необходимо отметить значительную роль скрытой теплоты водяного пара (34 %) и избытка воздуха (9 %) в тепловых потерях.

4.2.3. Общие принципы работы печи Thermylis-HTFB

В печи с псевдоожиженным слоем частицы предварительно откалиброванного песка переходят во взвешенное состояние под действием восходящего потока предварительно нагретого воздуха. На рис. 22 показана зона псевдоожижения песка с помощью потока воздуха (см. гл. 3, п. 7). Соотношение между скоростями u_1 и



u_0 , ограничивающими зону псевдоожищения, составляет от 1 до 10, а характеристическая кривая зависит от гранулометрического состава и плотности песка, составляющего слой. Физические и термодинамические параметры псевдоожиженных слоев подробно описаны в справочных изданиях Daizo Kurii и Octave Levenspiel «Fluidisation engineering» («Инжиниринг псевдоожижения») и Max Leva «Fluidisation» («Псевдоожижение»).

Печь с псевдоожиженным слоем **Thermylis-HTFB** (рис. 21) компании «Дегремон» является печью с плотным псевдоожиженным слоем без переливания через край слоя.

Слой псевдоожиженного песка при температуре сжигания 800–850 °С представляет собой чрезвычайно турбулентную среду, в которой теплообмен характеризуется очень высокими значениями коэффициента теплопередачи. Обезвоженные осадки, поступающие в этот слой, очень быстро разрушаются за счет турбулентности песка. Испарение воды, а также сжигание ОВ происходит постоянно, при этом воздух псевдоожижения играет роль агента, поддерживающего горение.

Поскольку переливания слоя через край не происходит, высота слоя при расширении остается стабильной (за исключением потерь песка, вызванных трением). Действительно, минеральное вещество осадка имеет очень низкие гранулометрические характеристики по сравнению с крупинками песка слоя, вследствие чего масса минеральной золы пневматически перемещается в верхнюю зону печи, а затем выходит в газоотводные каналы дымовых газов (летучая зола).

4.2.4. Конструкция печи **Thermylis-HTFB**

Печь **Thermylis-HTFB** имеет металлический корпус, внутренность которого выложена огнеупорным кирпичом. Она состоит из шести частей, которые образуют снизу вверх самонесущую и стабильную конструкцию.

■ Воздушная камера

Воздушная камера цилиндрической формы через широкое радиальное входное отверстие по трубопроводу получает предварительно нагретый воздух псевдоожижения, подаваемый установкой нагнетания воздуха. Если этот воздух имеет темпе-

ратуру ниже 250 °С, то речь идет о **холодной воздушной камере**, в противном случае воздушная камера называется горячей. Большинство изготавливаемых печей с псевдоожиженным слоем принадлежит к типу печей с **горячей воздушной камерой**.

Горячая воздушная камера облицована силикатно-алюминиевым огнеупорным материалом (фото 9) с промежуточным изолятором между корпусом и собственно огнеупорной частью. Верхняя часть воздушной камеры поддерживает купол псевдоожижения. Воздушная камера оснащена горелкой (которую можно снять), предназначенной для предварительного нагрева подаваемого воздуха при запуске печи.



Фото 9. Воздушная (дутьевая) камера печи НТБФ

— **Купол псевдоожижения**. Купол псевдоожижения является самой важной частью печи, так как именно в нем происходит распределение воздуха псевдоожижения. В печах с горячей воздушной камерой он состоит из колец, образованных рядами огнеупорных фасонных кирпичей. Кольца сжимают друг друга таким образом, что образуют самонесущий свод. Каждый фасонный кирпич имеет вертикальное отверстие, к которому подсоединена форсунка псевдоожижения. Число таких форсунок и их сечение составляют открытую поверхность, которая определяет потери напора в куполе псевдоожижения, как правило составляющие около 50–60 бар. У модели с холодной воздушной камерой купол псевдоожижения состоит из «сэндвича» — вогнутого стального огнеупорного листа, к которому припаяны форсунки псевдоожижения, погруженные в огнеупорную бетонную оболочку.

— **Форсунки псевдоожижения**. Форсунки псевдоожижения (фото 10) обычно имеют форму гриба с круглой головкой, они изготавливаются из огнеупорного чугуна и плотно укрепляются в отверстиях кирпичного основания. Скорость воздуха в них составляет около 40 м/с. Форсунки также являются важными элементами конструкции печи. Потеря любой форсунки приводит к серьезному сбою в работе печи, так как из-за прямого прохождения песка в воздушную камеру могут возникнуть проблемы с псевдоожижением.



Фото 10. Решетка псевдоожижения, снабженная форсунками (печь НТБФ)

■ Зона псевдоожижения

Высота зоны псевдоожижения соответствует высоте расширенного слоя песка и обычно составляет от 1,5 до 2 м. Она облицована огнеупорными силикатно-алюми-

ниевыми кирпичами и имеет изоляционную прокладку между огнеупорами и металлическим корпусом. Именно в эту зону поступают осадки и инжестируемое вспомогательное топливо (мазут, газ или биогаз).

■ Зона расширения

Зона расширения, называемая также фрибордом (*freeboard*), имеет увеличивающееся с высотой поперечное сечение, рассчитанное на увеличение объема газовых продуктов под воздействием температуры и сгорания. Это позволяет постепенно снизить скорость увлечения потока и в результате дефлюидизировать более мелкие частицы песка. Зона расширения также служит для дожигания, так как продукты сгорания здесь дольше задерживаются (не менее 5 с), что позволяет в любых условиях обеспечить соблюдение нормативных требований по сжиганию отходов. В ней же происходит добавление песка псевдооживления, чтобы компенсировать потери, вызванные истиранием.



Фото 11. Самонесущий огнеупорный купол (печь HTBF)

Этот канал выполнен из огнеупорного материала и должен иметь компенсатор расширения (компенсаторную муфту).

■ Внешняя обшивка печи

Печь окружена комплектом мостков, независимых от ее конструкции. Необходимо иметь не менее двух уровней мостков: один — на уровне подачи осадков и вспомогательного топлива, а другой — на вершине свода, выходящий на газоотводный канал продуктов сгорания.

■ Верхний свод

Верхний свод (фото 11) сформирован из фасонных огнеупорных кирпичей и образует вогнутую самонесущую конструкцию, опирающуюся на внешний кожух зоны расширения. В центре свода расположено отверстие выходного дымохода для продуктов сгорания. В свод также встроены инжекторы воды для регулирования температуры в печи (в целях безопасности).

■ Соединительный канал

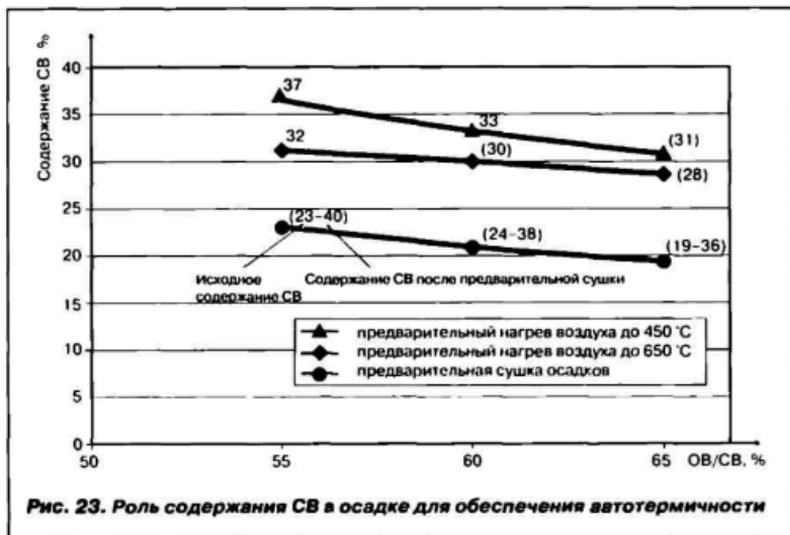
Канал соединяет выход из печи и вход в теплообменник рекуперации тепловой энергии.

4.2.5. Оптимизация потребления энергии

4.2.5.1. Стремление к автотермичности

Оптимизация потребления энергии является ключевым вопросом при проектировании цеха самостоятельного сжигания осадков. Например, проектировщики систематически стремятся к автотермичности таких установок путем оптимальной утилизации сухого тепла продуктов сгорания. Результатом этого является компромиссное решение между минимизацией потребления дополнительного топлива и снижением капитальных затрат и эксплуатационных расходов.

На основе данных, приведенных на рис. 23, можно рассматривать три различных варианта оптимизации.



■ **Вариант 1 (рис 24)**

Для предварительного нагрева воздуха псевдооживления достаточно частичной рекуперации сухого тепла дымовых газов. Тем не менее температура 650 °С пред-



ставляет собой тот максимум, которого можно достигнуть на разумных условиях с точки зрения энергопотребления

■ Вариант 2 (рис 25)

Для рекуперации максимума энергии, содержащейся в сухом тепле дымовых газов, в цех сжигания встраивают котел-утилизатор, соединенный с сушилкой. В результате значительная часть воды, содержащаяся в осадках, не подвергается в печи выпариванию или перегреву.



Рис. 25. Термическая схема с котлом-утилизатором пара

■ Вариант 3 (рис 26)

В варианте 3 речь также идет о полной рекуперации сухого тепла продуктов сгорания, однако это происходит в смешанной системе. Как и в первом варианте, устанавливают теплообменник для предварительного нагрева воздуха псевдоожижения, но кроме этого устанавливают котел с термическим маслом, имеющим температуру около 200 °C, что также обеспечивает частичную сушку осадков. При такой конфигурации установки сжигания большое значение имеет содержание воды в поступающих осадках, что показано на примере в табл. 9, строки 1, 2: частичная предварительная сушка (от 26 до 34 % СВ) позволяет дополнительно утилизировать до 5700 м³/ч дымовых газов (паров воды), т. е. до 25 % таких выделений. Таким образом, данный вариант позволяет вырабатывать некоторую избыточную энергию вместо добавления 2,7 МВт · ч/ч в виде дополнительного топлива.

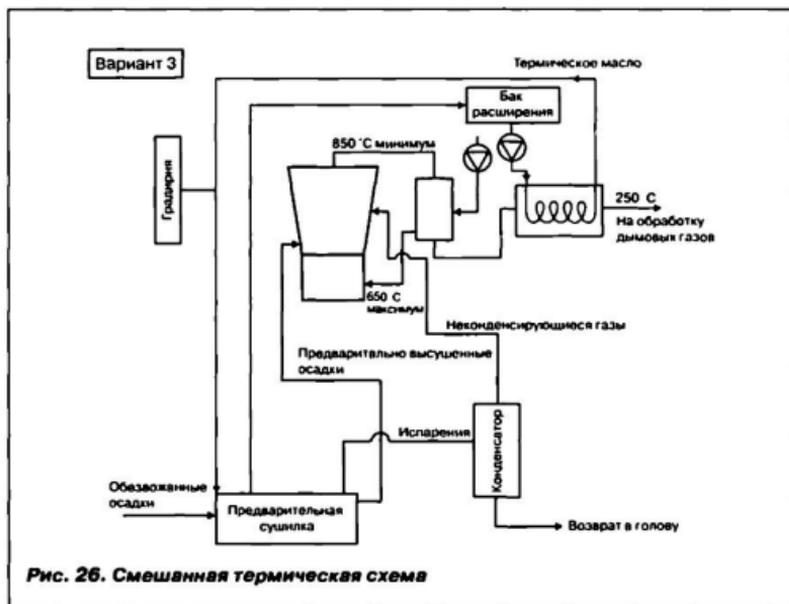


Таблица 9

	CO ₂ об %	H ₂ O, об %	O ₂ об %	N ₂ об %	Расход дымовых газов, Nm ³ /ч	Выигрыш по дымовым газам относительно варианта 1
Самостоятельное сжигание осадков (26 % СВ) без предварительной сушки	7,1	42,6	3,5	46,8	22 700	
Самостоятельное сжигание осадков с предварительной сушкой (34 % СВ) (вариант 3)	7,2	39,3	4,4	49	17 000	25 %
Полная сушка (90 % СВ) и пиролиз высушенных осадков	7,3	8,5	10,5	73,7	8000 (собственно дымовые газы) (вместо 16 450)	65 % ¹ (+27 %)

¹ См п 4 3 1 Концентрация кислорода O₂ определяется воздухом охлаждения (8500 м³/ч), который вводится в зону дожигания (термическое окисление синтез-газа) На выходе из реактора термолиза эта концентрация практически ничтожна. Необходимо отметить, что высокий расход дымовых газов и повышенная влажность, характеризующие первые два способа сжигания, вызваны избытком воздуха и большим содержанием воды в осадках

Таблица 10
Стремление к автотермичности

	<i>Преимущества и комментарии</i>	<i>Недостатки и комментарии</i>
Вариант 1	<ul style="list-style-type: none"> - Самая простая и не требующая больших затрат система, в которой используется либо конвекционный теплообменник, либо теплообменник с трубками для дымовых газов. В настоящее время хорошо освоена в строительстве и эксплуатации - Если такая система позволяет обеспечить полную или почти полную автотермичность, то ее выбирают автоматически. Вариант подходит также для всех установок с невысокой производительностью (< 1 т/ч по СВ) 	<ul style="list-style-type: none"> - Происходит лишь частичная рекуперация энергии, что не всегда гарантирует автотермичность - Технологические ограничения заключаются в невозможности работать при температурах воздуха псевдоожигания выше 650 °С - В лучшем случае (наиболее полная рекуперация) дымовые газы, выходящие из теплообменника, имеют температуру примерно 550 °С. Поэтому необходимо обеспечивать последующее охлаждение
Вариант 2	<ul style="list-style-type: none"> - Система позволяет наилучшим способом утилизировать энергию и достичь наиболее низких критических значений содержания СВ, обеспечивая при этом автотермичность - Котел рекуперации пара является наиболее подходящим решением для обработки дымовых газов, содержащих пыль (летучие золы) - Позволяет работать с холодной воздушной камерой - Позволяет охладить дымовые газы в достаточной степени, чтобы сразу же проводить их обработку 	<ul style="list-style-type: none"> - Котел рекуперации насыщенного пара представляет собой громоздкую систему, использование которой ограничено соответствующими нормативными требованиями - Необходимо устанавливать непрямоую сушилку, обеспечивающую на выходе чаще всего лишь 40 % содержания СВ - Так как содержание СВ в предварительно высушенных осадках составляет всего 40 %, то в работе необходимо использовать поршневой насос - Необходимость обрабатывать пары от предварительной сушки осадков - Обычно используется для установок сжигания с большой производительностью (> 4 т/ч по СВ)
Вариант 3	<ul style="list-style-type: none"> - Система утилизирует энергию достаточно хорошо (немного меньше, чем система по варианту 2) 	<ul style="list-style-type: none"> - Эксплуатация котла с термическим маслом при работе с дымовыми газами, содержащими пыль, может представлять определенные трудности - При засорении первого теплообменника масляный котел будет испытывать большие термические перегрузки

При смешанной термической схеме удастся избежать установок парового котла, наличие которого предполагает серьезные ограничения при проектировании и эксплуатации. Котел с термическим маслом может быть при необходимости заменен котлом с напорной водой.

Каждый из трех описанных выше вариантов имеет свои преимущества и недостатки (табл. 10), которые необходимо учитывать перед тем, как сделать окончательный выбор и перейти к инженерной разработке проекта.

4.2.5.2. Технологии, применяемые в процессах рекуперации энергии

■ Теплообменник предварительного нагрева воздуха псевдоожигания

Теплообменники конвекционные многоходовые с перекрестными трубками: воздух псевдоожигания проходит в лучки труб, а дымовые газы — в каландр теплообменника. Такие теплообменники раньше применялись регулярно, но проблемы

возникали из-за нарушения герметичности при переходе трубок в каландр теплообменников. Теплообменники очень чувствительны к присутствию пыли. В частности, это влияет на головной блок, где могут возникнуть отложения, особенно при перегреве дымовых газов до температуры, близкой к точке размягчения золы (на этот процесс также оказывает влияние содержание фосфора).

Теплообменники с **трубками для дымовых газов** в данном случае работа теплообменника прямо противоположна вышеописанному случаю — дымовые газы проходят по трубкам, в то время как воздух циркулирует в каландре теплообменника. Такие теплообменники отличаются простой и компактной конструкцией. Тем не менее необходимо предусмотреть компенсационные соединения (температурные швы) на газоотводных трубках, а также следить, чтобы эти трубки не засорились золой — они должны прочищаться при проведении технического обслуживания.

Теплообменники **радиаторные/конвекционные** имеют двойную перегородку, которая используется как радиаторная часть аппарата. Дымовые газы сначала проходят в радиаторную часть, где они отдают долю своего сухого тепла, и, таким образом, пучок труб подвергается меньшему термическому воздействию.

Радиаторные теплообменники с трубками для дымовых газов работают по тому же принципу, что и теплообменники с трубками для дымовых газов.

Для наиболее распространенных случаев установок сжигания осадков (вариант 1) рекомендуется использовать теплообменники с трубками для дымовых газов.

■ Котел-утилизатор пара

В отличие от котлов, применяемых в установках обработки бытовых отходов (с перегретым паром от турбины для производства электроэнергии), в данном случае речь идет о простом котле с естественной циркуляцией, производящем сухой насыщенный пар. Эта установка должна включать градирню, чтобы рассеивать пар, который систематически производится в избыточном количестве во время нагревательных процедур, выполняемых до начала подачи предварительно высушенных осадков в печь. Необходимо отметить, что практически невозможно складировать и разгружать осадки с содержанием СВ от 35 до 65 %.

■ Котел с термическим маслом

Для защиты классических теплообменников от пыли в начале термической схемы должны быть установлены защитные сепараторы (например, циклонного типа).

4.2.6. Эксплуатация

Печь **Thermyle-HTFB**, как и любая другая печь с псевдоожиженным слоем, довольно плохо приспособлена к перепадам объема поступающих осадков, так как имеет постоянный тепловой баланс (допустимы отклонения около 15 % от номинальной нагрузки). Однако данная печь отличается **большой гибкостью при эксплуатации** — легко переносит частые остановки и запуски, что позволяет предусмотреть такой режим эксплуатации, при котором сжигание может быть приостановлено на ночь или на выходные дни.

Для обеспечения контроля за процессом необходимо установить ряд автоматических устройств. В частности, качество сжигания управляется в соответствии с алгоритмом регулирования, и таким образом, постоянного присутствия оператора на посту управления не требуется. Тем не менее для быстрого реагирования в случае сбоя в работе (например, при перебоях в электроснабжении) необходимо, чтобы оператор постоянно находился поблизости.

4.3. Термолиз и пиролиз в обработке осадков

4.3.1. Общие положения и определения

На рис. 27 приведена схема термических процессов. Мы будем называть **пиролизом** термический процесс разложения ОВ осадков, который проходит **при недостатке воздуха** по сравнению со стехиометрическими расчетами, а **термолизом** — такой же термический процесс, но проходящий при **полном отсутствии экзогенного кислорода**.

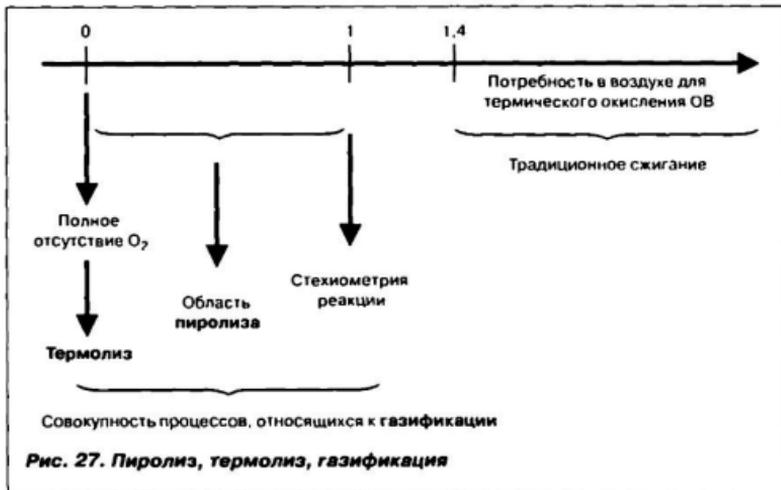


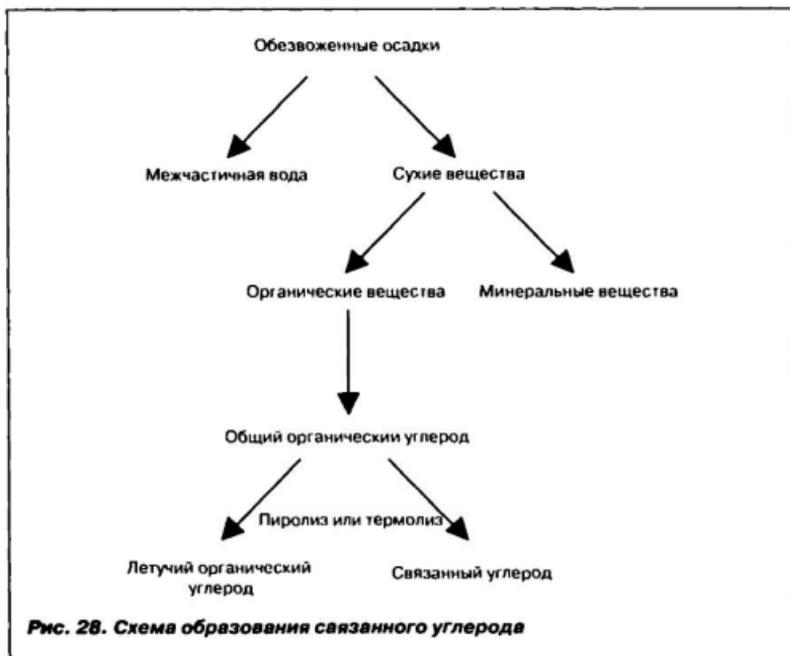
Рис. 27. Пиролиз, термолиз, газификация

Недостаток воздуха вызывает следующие последствия

- разделяются процессы разложения ОВ и сгорания синтез-газа (образуется меньшее количество NO_x);
- образуется меньшее количество дымовых газов (см. табл. 9, строку 3) и полностью или частично удаляется балласт азота в восстановительных зонах;
- появляется возможность регулирования температур разложения ОВ независимо от условий, требуемых для успешного сжигания;
- провоцируется неполное сжигание ОВ (пиролиз), что позволяет перевести некоторые загрязняющие вещества в твердую, а не в газовую фазу. В отсутствие кислорода O_2 (термолиз) все процессы термического разложения являются глубоко эндотермическими. Поэтому необходимо предусмотреть дополнительное введение энергии с помощью рециркуляции тепла, возможной благодаря утилизации энергии в конце технологической линии;
- возникает возможность управления процессом разложения ОВ в различных зонах, а также обработкой связанного углерода.

На рис. 28 показана схема образования **связанного углерода**

Легучий органический углерод представляет собой фракцию общего органического углерода (ООУ), которая определяется весовой потерей при температуре 550°C



и полном отсутствии кислорода. При таком разложении остается субстрат, состоящий из минерального вещества и нелетучего углеродного остатка, который считается минеральным углеродом

Количество связанного углерода составляет около 15–20 % от ООУ в осадке. При сжигании в псевдооживленном слое (окисляющее сжигание) это различие не имеет никакого значения. Избыток воздуха и коэффициенты передачи являются достаточно высокими, чтобы внутри слоя сгорание летучего и связанного углерода было неразличимо.

Совсем иначе обстоит дело в процессах, проходящих «при недостатке воздуха» (пиролиз и термоллиз), так как в этом случае такое различие является существенно важным и даже может определять границу, которая разделяет технологии термического окисления, разрушающие связанный углерод, и термические восстановительные технологии, оставляющие связанный углерод неокисленным.

Существует второе основное различие между термоллизом и пиролизом — это тип возможной утилизации энергии в конце термической линии обработки. Так как **термолитические процессы** проходят при полном отсутствии кислорода, они позволяют обрабатывать образующиеся газовые продукты с помощью химических технологий, а также получать синтез-газ или биологическое жидкое топливо при конденсации синтез-газа (при этом должен быть подобран соответствующий температурный режим для проведения разложения). Производство синтетического газа и биологического жидкого топлива позволяет более свободно во времени распоряжаться последним (при соответствующем хранении). В силу технологических и термических

ограничений термолиз применяется только для высушенных осадков с содержанием СВ более 90 %

Пиролиз можно применять к обезвоженным осадкам, если эти осадки позволяют обеспечить автотермичность, а также к высушенным осадкам, содержание СВ которых находится в диапазоне от 65 до 90 %. По сути, этот процесс представляет собой контролируемое сжигание при недостатке воздуха, которое генерирует бедный (по теплосодержанию) синтез-газ — смесь сырого синтетического газа, полученного в результате процессов разложения, и продуктов частичного сгорания, образовавшихся в результате неполного окисления полученных веществ. С энергетической точки зрения нецелесообразно проводить очистку такого бедного синтетического газа, поэтому он должен использоваться как источник энергии непосредственно в технологической линии

Тепловой КПД термолиза и пиролиза примерно одинаков, однако они различаются по способам реализации

— в большинстве случаев **термолиз** проводится в реакторе с двойным корпусом (обшивкой), внутри которого вращается барабан, при этом тепло подводится исключительно через корпус (нужно отметить, что существуют и другие решения, в частности способ, разработанный компанией «Lurgi», который, однако, в настоящее время для высушенных осадков не применяется);

— процесс **пиролиза**, описанный выше, обычно проходит в вертикальных ярусных (многоподовых) печах

В результате термолиза и пиролиза образуется минеральный остаток, состоящий из минеральных зол в том виде, в котором они существуют при сжигании только осадков, но с добавлением связанного углерода (вся масса называется полукоксом). Перерабатывается полукокс в отдельном реакторе за исключением случая, когда пиролиз проходит в ярусной печи, в которой также можно проводить его переработку (см п 4 3 2)

4.3.2. Пиролиз в ярусных печах

Известны две основные схемы

— **вариант 1** (рис 29) восстановительное разложение ОВ и термическое окисление связанного углерода осуществляются в одной и той же печи. Верхние ярусы предназначены для возможной сушки (если поступают влажные осадки), а затем для пиролиза, а нижние — для окисления связанного углерода. Два газовых потока расходятся в нижнюю и верхнюю части печи и смешиваются при дожигании, во время которого происходит полное сгорание несгоревших газовых остатков, а энергия утилизируется в конце технологической линии;

— **вариант 2** (рис 30) предусмотрен для обработки высушенных осадков. ярусная печь предназначена исключительно для восстановительного термического разложения ОВ. Полукокс выгружается из печи и направляется в малую печь с классическим псевдооживленным слоем, в которой он сжигается. Смесь двух газовых потоков обрабатывается с помощью окислительного дожига с утилизацией энергии в конце схемы

Вариант 2 представляет особый интерес для обработки высушенных осадков, поскольку при нем

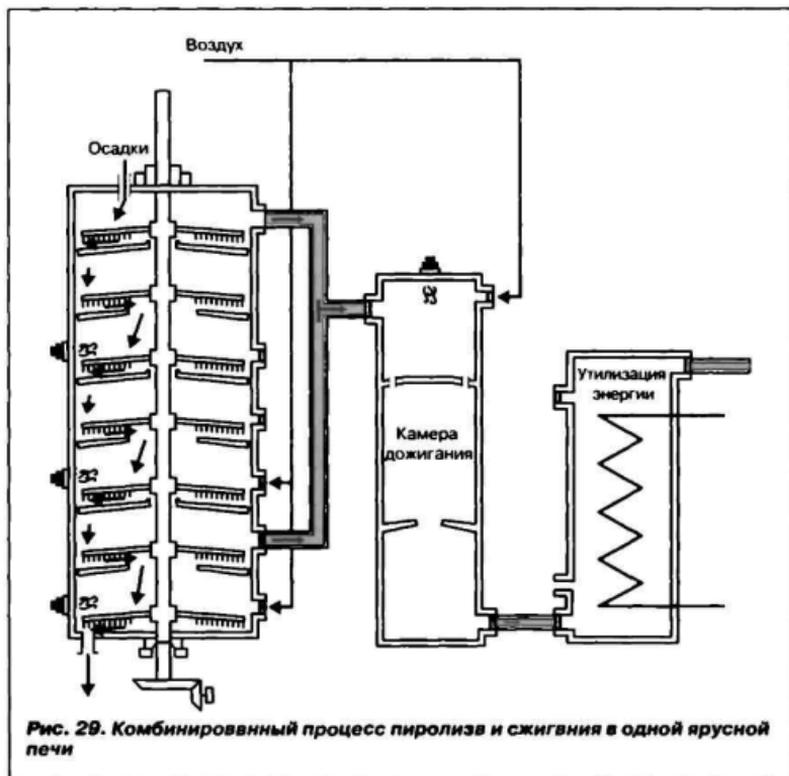
— обеспечивается значительное снижение размеров ярусной печи (приблизительно в два раза). Действительно, кинетика окисления связанного углерода в ярусной печи явно намного ниже, чем в печи с псевдооживленным слоем;

— появляется возможность более строгого управления процессом пиролиза, так как в этом варианте значительно легче поддерживать температуру на среднем уровне (± 500 °C). Таким образом удастся следить за тем, чтобы не образова-

лись диоксины, а также соблюдать восстановительный режим работы системы (нет необходимости подвода тепла на верхние ярусы — не нужна сушка). В результате образуется сырой синтетический газ, более богатый по теплосодержанию, чем в варианте 1, что позволяет добиться более высоких температур во время дожигания:

— печь с псевдооживленным слоем может использоваться в системах, работающих с агломерирующимся переливающимся слоем, что позволяет вывести оплавленные минеральные золы, а это влечет за собой более высокую степень коксования. В результате процесс окончательного вывоза шлаков уподобляется выведению продуктов сгорания при сжигании бытового мусора,

— смесь двух газовых потоков (восстановительных и окисляющих) при дожигании позволяет достичь более высоких температур (до 1200 °С) практически при отсутствии пыли, что представляет собой положительный результат (не выделяются диоксины и/или NO_x , и отсутствует риск образования накали на огнеупорном покрытии и теплообменниках)





Печь с псевдоожиженным слоем можно заменить (см. зону, ограниченную штриховой красной линией на рис. 30) на **плазменную горелку (факел)**, что точно гарантирует остекловывание шлаковых зол.

Общий тепловой баланс варианта 2 показывает влияние содержания летучих веществ в осадках на возможность утилизации энергии при когенерации (производстве термической и электрической энергии — табл. 11) и с помощью котла-утилизатора (передача энергии теплоносителю — табл. 12).

Таблица 11
Газификация и обжиг шлаков (зол): тепловой баланс
(для случая когенерации)

Элементы теплового баланса	Единица измерения	Соотношение ЛВ/СВ, %		
		80	65	50
Энтальпия осадков	кВт ч/ч	2297	1865	1435
Энтальпия полученного газа	кВт ч/ч	1801	1452	1091
Вырабатываемая электроэнергия	кВт ч/ч	710	558	393
Рекуперлируемая теплота	кВт ч/ч	598	470	332
Тепловые потери сухого тепла	кВт ч/ч	496	413	344
Общие потери (по отношению к энтальпии осадков)	кВт ч/ч %	989 43,1	837 44,9	710 49,5

Таблица 12**Газификация и обжиг шлаков (зол): тепловой баланс (для случая производства тепловой энергии)**

Элементы теплового баланса	Единица измерения	Соотношение ЛВ/СВ, %		
		80	65	50
Энтальпия осадков	кВт ч/ч	2297	1865	1435
Энтальпия вырабатываемого газа	кВт ч/ч	1801	1452	1091
Рекуперлируемая теплота	кВт ч/ч	1665	1310	924
Тепловые потери сухого торма	кВт ч/ч	496	413	344
Общие потери (по отношению к энтальпии осадков)	кВт ч/ч	632	555	511
	%	27,5	29,8	35,6

4.3.3. Термолиз со сжижением во вращающейся печи

Способ термолиза со сжижением во вращающейся печи, применяемый исключительно для обработки высушенных осадков, был разработан австралийской компанией «ESI». Он предназначен для производства биологического топлива, получаемого за счет конденсации синтетического газа, и выгодно отличается от прочих тем, что был первым применен в Австралии (г Перт) в промышленном масштабе (25 т/сут). Это дает возможность получить опыт эксплуатации, необходимый для разработки следующих проектов и совершенствования технологий.

4.3.4. Способы термолиза с производством синтез-газа

Способы термолиза с производством синтез-газа напоминают технологии описанные в п. 4.3.3, но в данном случае в термолизном реакторе применяют очень высокие температуры, чтобы добиться более глубокого крекинга органических цепей, а также получить синтез-газ для последующей очистки (от смол, цианидов и т. д.). Очистка такого газа представляет собой довольно сложный в эксплуатационном плане процесс, который пока еще не освоен должным образом.

Способ, разработанный компанией «Lurgi» (способ «LR»), основан на псевдосжижении с помощью синтетического газа, образующегося при разложении высушенных осадков. При этом подвод тепла в реактор происходит за счет рекуперации сухого тепла минеральных зол, получаемых при сжигании смеси шлаков (зол), и связанного углерода. Так как при реализации данного способа возникает та же серьезная проблема качественной очистки синтетического газа, то эта технология пока еще не нашла своего промышленного применения.

4.4. Разложение ОВ осадков путем совместного сжигания

Совместное сжигание, как следует из самого определения, предполагает, что к основному потоку материалов, подвергаемому термической обработке, добавляется поток осадков, обезвоженных и полностью или частично высушенных. Это становится целесообразным при возможности получения экономического эффекта от

дополнительной выработки энергии Существует четыре варианта совместного сжигания

- сжигание в печи для промышленных специальных отходов,
- сжигание на ТЭС (теплоэлектростанции),
- сжигание в печи для обжига цемента,
- сжигание осадков с бытовыми отходами

В трех первых вариантах сжиганию подвергаются высушенные осадки с содержанием СВ выше 90 % Это ограничение связано с применяемыми технологиями, в соответствии с которыми необходимо одновременно обеспечить максимальное значение НТС и минимальное количество водяного пара в дымовых газах, подлежащих обработке Сжигание осадков совместно с промышленными специальными отходами или совместное сжигание на ТЭС вряд ли может восприниматься серьезно, по крайней мере во Франции На сегодняшний день обработка высушенных осадков на теплоэлектростанциях имеет определенную актуальность на территории, например, Германии

При совместном сжигании в печах для обжига цемента (известны несколько внедрений в Швейцарии) существует дополнительное ограничение, связанное с загрязнениями, содержащимися в минеральных веществах, которые могут изменить качество и характеристики получаемого клинкера В этой связи особые проблемы создает присутствие фосфора, которое может повлиять на надежность всей технологической линии

В настоящее время самой распространенной технологической линией сжигания осадков является их совместная обработка с бытовыми отходами в печах с решетками Таким образом сжигают либо обезвоженные осадки (способ IC 850), либо предварительно полностью или частично высушенные (величина НТС осадков в обоих случаях должна соответствовать значению НТС бытовых отходов).

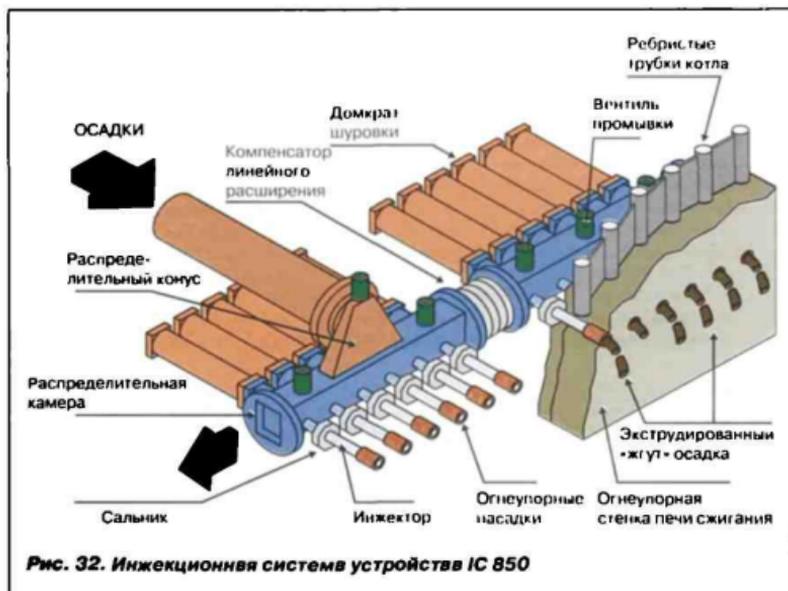
4.4.1. Сжигание вязких осадков совместно с бытовыми отходами: способ IC 850

Обработка бытовых отходов обычно проводится в печах с решетками

Для введения осадков в печь сжигания бытовых отходов разработано устройство IC 850, монтаж которого на передней стенке печи показан на рис. 31 Оно (рис. 32) состоит из ряда шуровочных (перемешивающих) инжекторов, которые приводятся в действие стержнем домкрата На выходе из инжекторов происходит образование экструдированного «жгута» диаметром 20 мм, который начинает разрываться под действием своего собственного веса (средняя длина сегмента — 10 см); формирующиеся валики падают на решетку печи в начало зоны сжигания отходов

Совместное сжигание вязких осадков с бытовыми отходами должно проводиться с учетом ограничений, обусловленных процессом сжигания последних, а именно

- необходимо соблюдать параметры диаграммы сжигания, которая предоставляется изготовителем печи с решеткой (объем обрабатываемых ОБ в зависимости от их НТС и приложенной термической нагрузки);
- нельзя изменять качество получаемых шлаков, так как данная технология направлена на получение легко утилизируемых шлаков в соответствии с нормативами, относящимися к подобным установкам. Таким образом, при совместном сжигании осадков характеристики получаемых шлаков могут изменяться только в пределах установленных значений (в 2002 г. принято соответствующее постановление о шлаках, выдержки из французского законодательства приведены п. 7);



— необходимо учитывать влияние особых загрязнений, вносимых осадками в систему обработки дымовых газов, и особенно загрязнений, содержащих серу и ртуть

Из-за вышеуказанных условий отношение количества исходных осадков к массе подлежащих сжиганию бытовых отходов (в тоннах) ограничивается 10–12 %

Преимущества способа **IC 850** по отношению к другим предложенным технологиям (например, к инжекции обезвоженных осадков в бункер или к пульверизации вязких осадков в камере сгорания) заключаются в следующем

- равномерное распределение экструдированных осадков по решетке,
- подвод осадков (с сильными эндотермическими свойствами) в самую горячую зону решетки,
- оседание большей части минеральных зол осадков в шлаках и выделение с летучими золами (копотью) лишь их незначительной части (во Франции используется термин REFIMUM — шлаки дымовых газов от сжигания бытовых отходов)

В целом, оценивая прямую стоимость данной технологии, можно сказать, что способ **IC 850** сжигания осадков является самым экономичным из предлагаемых сегодня на рынке.

4.4.2. Сжигание предварительно высушенных осадков с бытовыми отходами

Чаще всего совместно с бытовыми отходами сжигают предварительно высушенные осадки, имеющие гуже НТС, что и бытовые отходы (за счет частичной сушки содержание СВ осадков достигает 65 %) Очистные сооружения в Межеве и Лиможе (Франция) были спроектированы компанией «Дегремон» для работы по этой технологии с предварительной сушкой осадков по способу **Centridry** (см п 3 8 1)

Особое внимание должно уделяться перемещению и хранению предварительно высушенных осадков, так как за счет своей остаточной влажности такие осадки не всегда легко транспортируются после хранения. Во избежание затвердевания осадков в накопителе необходимо соблюдать предельный уровень содержания СВ для конкретного осадка, особенно если предполагается временное его хранение с последующим направлением в бункер вместе с пищевыми отходами. Если же приемлемым является вариант сброса осадков непосредственно в приемную яму, то необходимо учитывать только избыточный уровень пыли и необходимость гомогенизации получаемой смеси

Совместное сжигание полностью высушенных осадков, прошедших окатывание или брикетирование (применяемое, например, на очистных сооружениях г Вильфранш-сюр-Саон, Франция), также возможно, но при условии соблюдения соответствующего соотношения между осадками и отходами, необходимого для предотвращения местных отвердеваний и отложений осадков на огнеупорной облицовке печей

5. Методы очистки дымовых газов после термической обработки осадков

Все описанные выше технологии термической обработки осадков самостоятельное сжигание, пиролиз, термолиз, совместное сжигание — связаны с необходимостью сооружать установки для очистки выделяющихся газов перед их выбросом в окружающую среду. Состав выбросов должен соответствовать требованиям

действующих нормативных документов. В настоящее время в Европе действует Европейская директива, принятая 4 декабря 2000 г. (табл. 13), которая была включена в законодательство Франции 20 сентября 2002 г. (см. также п. 7, нормативные документы)

Таблица 13

Выписка из Европейской директивы от 4 декабря 2000 г.

Загрязняющие вещества	Предельное значение, мг/Нм ³
CO	50
Общее содержание пыли	10
HCl	10
ООУ	10
HF	1
SO ₂	50
NO _x	200
Cd + Tl	0,05
Hg и соединения ртути	0,05
Sb + As + Pb + Co + Cu + Mn + Ni + V	0,5
Диоксины и фураны	0,1 нгТЕ ¹ /Нм ³

¹ ТЕ — токсический эквивалент

Как упоминалось, **объем подлежащих обработке дымовых газов** (см. п. 4.2.5, табл. 9) может очень сильно меняться (от 5000 до 15 000 Нм³/ч на 1 т СВ) в зависимости

- от **избытка используемого воздуха** (балластный кислород и особенно азот) и **количества вводимой воды** (влажность поступающих осадков). В этом случае применение пиролиза представляется более целесообразным по сравнению со сжиганием, причем предварительное высушивание осадков является необходимым для любого метода.
- от вида обрабатываемых осадков и особенно содержания в них летучих веществ, которые значительно увеличивают объем продуктов сгорания.
- от применения воздуха (для охлаждения) в технологической линии обработки дымовых газов (см. табл. 9, строка 3)

5.1. Необходимые исходные данные для расчета установки по очистке дымовых газов

Необходимо знать номинальный расход и состав дымовых газов, подлежащих обработке, а также температуру, при которой данные газы поступают в установку. Расход выражают в нормальных кубических метрах в час (Нм³/ч) или в фактических кубических метрах в час (м³/ч) при соответствующей температуре. На основании значений объемного или массового содержания CO₂, H₂O, N₂, O₂ рассчитываются

их массовые потоки (с учетом относительной влажности и температуры насыщения) Необходимо также оценка содержания загрязняющих веществ, поскольку они могут иметь разную природу и их наличие будет влиять на выбор способа обработки и/или применяемой технологии

■ Пыль

Необходимо знать содержание пыли в потоке газов, измеряемое в граммах на нормальный кубический метр ($г/Нм^3$) Оно значительно изменяется в зависимости от проводимого процесса: при самостоятельном сжигании в псевдооживленном слое содержание пыли составляет от 20 до 50 $г/Нм^3$, при пиролизе или термоллизе — от 1 до 5 $г/м^3$ Кроме того, оно зависит от вида осадков (сброженные или нет)

■ Загрязнение галогенами

В осадках загрязнение галогенами чаще всего связано с присутствием хлора и фтора При отсутствии конкретных данных о наличии этих загрязнений в осадках ГСВ содержание хлора принимается равным 1 г Cl на 1 кг СВ осадка Из практики известно, что количество фтора обычно составляет десятую часть от содержания хлора.

■ Загрязнение серосодержащими веществами

Загрязнение серосодержащими веществами является одним из самых важных, несмотря на трудность его определения. При отсутствии таких данных содержание серы принимается равным 5 г S на 1 кг СВ осадков Необходимо отметить, что в случае самостоятельного сжигания в псевдооживленном слое определенная часть оксидов серы SO_2 или SO_3 будет адсорбироваться минеральными золами, которые составляют основную долю пыли, содержащейся в дымовых газах

■ Загрязнение летучими тяжелыми металлами

Загрязнение летучими тяжелыми металлами представлено в основном ртутью и в меньшей степени кадмием (также можно отметить таллий) Учитывая чувствительность обработки и предельно допустимое низкое значение содержания таких загрязнений, настоятельно рекомендуется проводить специальный анализ Если же анализ не проводится, то можно ориентироваться на значение 4 мг Hg на 1 кг СВ Значительная часть летучей ртути в газовой фазе вступает в реакцию с хлором и образует нелетучее соединение $HgCl_2$, растворимое в воде, особенно в кислой среде

■ Загрязнение нелетучими тяжелыми металлами

Несмотря на свои летучие свойства, свинец, цинк и мышьяк, образуя комплексы с другими соединениями, проявляют себя как нелетучие вещества Все эти металлы (см. табл. 13) фиксируются на минеральных золах. В свою очередь, это вызывает трудности при работе с золами (шлаками) Особенно непредсказуемым становится поведение шлаков при тестировании их на вымывание, которое проводится для выявления фракций, способных к вымыванию, что определяет дальнейшее использование зол (во Франции это регулируется нормативным актом, принятым в декабре 1992 г.).

Особый случай представляет присутствие в осадках хрома (осадки, получаемые в кожевенной промышленности), который при пиролизе сохраняет свою трехвалентную форму $Cr(III)$, однако сжигание преводит его в шестивалентную форму $Cr(VI)$, чрезвычайно токсичную и легко растворимую.

■ Загрязнение оксидами азота (NO_x)

Загрязнение оксидами азота трудно предвидеть заранее, и только практический опыт помогает правильному выбору соответствующего способа обработки выбросов. Необходимо отметить, что некоторые местные нормативные акты ужесточают свои требования по сравнению с европейскими директивами (200 мг/Нм^3). Надо признать, что это пороговое значение редко достигается при работе на установках с термической обработкой осадков, поэтому при проведении обработки типа SNCR (от англ. *selective non catalytic reduction* — селективное некаталитическое восстановление) можно гарантировать соблюдение такого предельного значения (см п. 5.2.4). Однако при ужесточении требований до значения 70 мг/Нм^3 (что соответствует положениям голландских стандартов) только применение обработки типа SCR (от англ. *selective catalytic reduction* — селективное каталитическое восстановление) может обеспечить соблюдение норм.

■ Загрязнения диоксинами и фуранами

Загрязнения диоксинами и фуранами также трудно прогнозировать, но при превышении предельного значения в $0,1 \text{ нг/Нм}^3$ необходимо проводить специальную обработку выбросов.

■ Появление клубов дымовых газов

Технические требования часто предписывают устранение клубов дыма. Их появление определяется по положению точки, характеризующей относительную влажность дымовых газов на диаграмме влажного воздуха, а также по гидрометрическим параметрам, определяемым метеорологической службой. При необходимости положение этой точки можно изменить, например нагревая дымовые газы.

5.2. Виды очистки дымовых газов

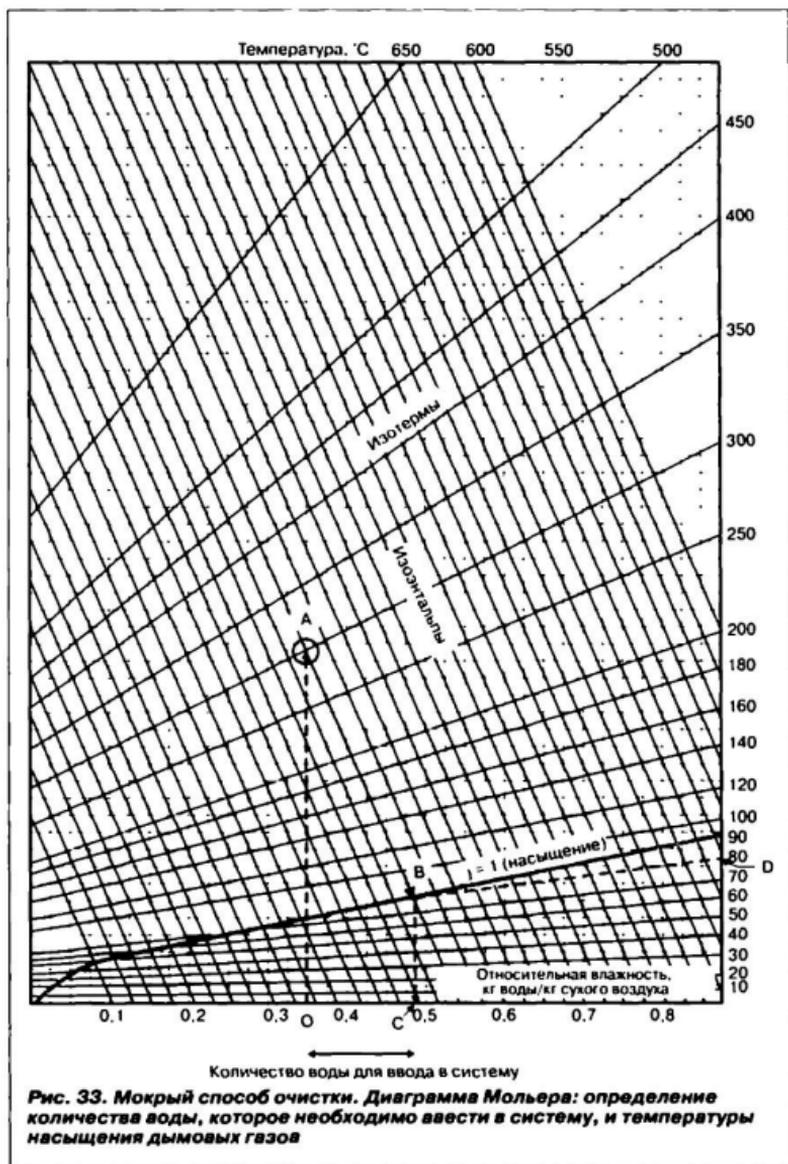
Существуют три основных вида очистки дымовых газов: мокрая, сухая и полумокрая. Наряду с ними можно встретить и комбинированные методы очистки.

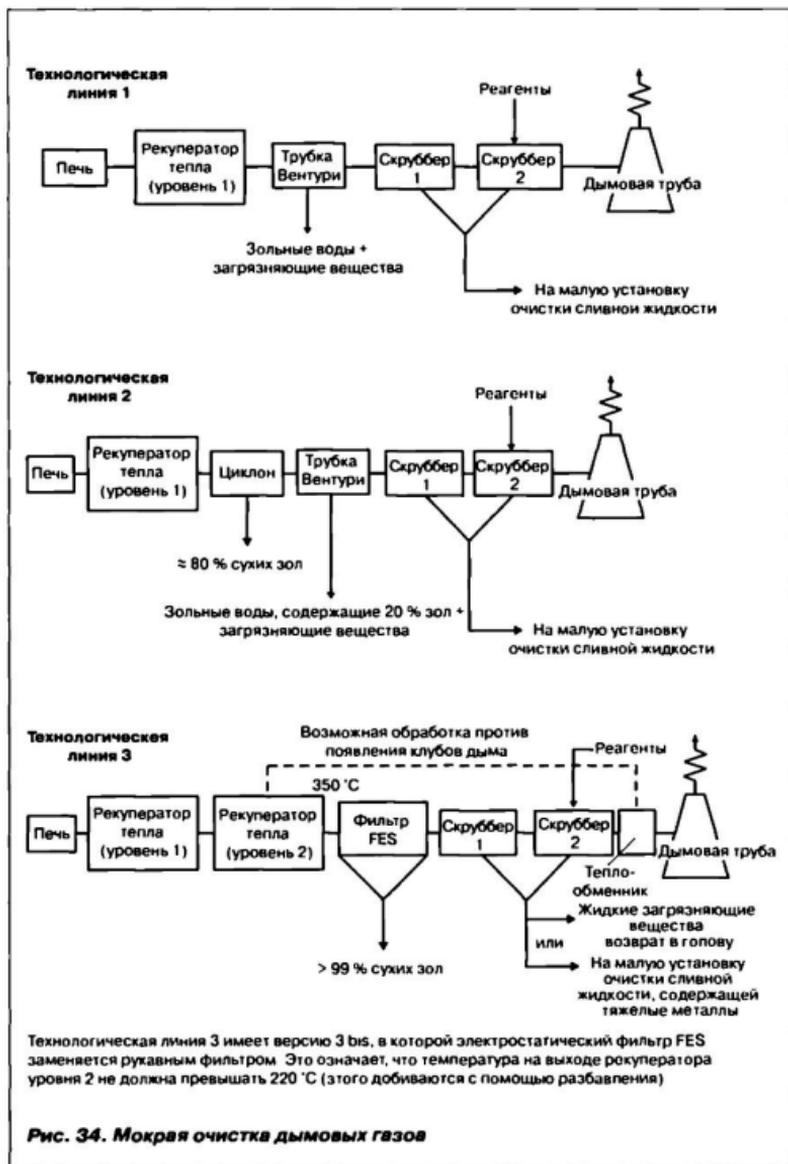
5.2.1. Мокрый способ очистки

Мокрый способ очистки основан на изобарическом расширении дымовых газов, при котором газы в присутствии воды переходят в состояние насыщения. В таких условиях охлажденные и насыщенные дымовые газы могут последовательно подвергаться различным обработкам, в результате которых загрязняющие вещества переходят из газовой фазы в жидкую. Очищенная газовая фаза может быть выброшена в окружающую среду в соответствии с действующими нормативными требованиями, а жидкая фаза должна либо пройти специальную обработку, либо быть возвращена в голову очистных сооружений, если это возможно.

Принцип мокрого способа основан на диаграмме влажного воздуха (рис. 33). В упрощенной форме этот процесс можно описать следующим образом:

- сначала определяют относительную влажность дымовых газов, подлежащих обработке. Она выражается в граммах воды на 1 кг сухих газов (например, точка О на рис. 33, влажность $0,35 \text{ кг воды/кг сухого воздуха}$);
- по вертикали от этой величины находят точку А, соответствующую температуре на входе в мокрую систему (например, $300 \text{ }^\circ\text{C}$), затем из этой точки спускаются до кривой насыщения ($\varphi = 1$), следуя прямой линией, параллельной изобарам (точка В);





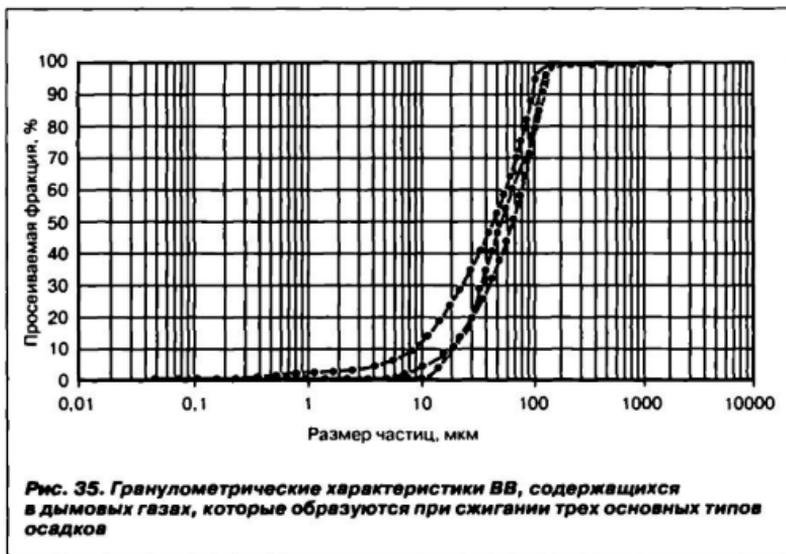
- от точки В по вертикали спускаются на ось абсцисс, чтобы определить влажность газов при насыщении (точка С),
- разница между влажностью при насыщении и исходной относительной влажностью составляет то количество воды, которое необходимо ввести в систему на 1 кг сухих дымов (длина отрезка ОС),
- от точки насыщения В на кривой $\varphi = 1$ проводят линию, параллельную изотермам, чтобы определить температуру насыщения дымовых газов (точка D)

Описанный процесс насыщения проводится в камере насыщения (англ. *quench*), в которую с небольшим избытком впрыскивается вода. Далее обработку продолжают два промывных аппарата (сито с дисками или насадками), каждый из которых снабжен рециркуляционным контуром с устройством слива для снижения концентрации или устройством подпитки

Преимущество способа мокрой очистки состоит в возможности введения газа в систему при повышенных температурах, например прямо после теплообменника предварительного нагрева воздуха псевдоожижения. Конечно, в этом случае уже не идет речи о дальнейшей утилизации остаточного тепла дымовых газов. Возможные технологические линии мокрой очистки показаны на рис. 34, в которых обрабатываются различные виды загрязнений

■ Пыль

Пыль удерживается в основном каплями воды, которые интенсивно встряхиваются из-за падения напора в трубке Вентури (камере насыщения). Падение напора должно соответствовать гранулометрической кривой пыли (типичная кривая показана на рис. 35). Это приводит к расходу промывной воды, полученной за счет внут-



ренной рециркуляции объема воды, примерно в 10 раз превышающего объем теоретического насыщения (последний равен длине отрезка ОС на рис. 33).

При использовании псевдоожиженного слоя (среднее содержание пыли 30 г/Нм^3), а также с учетом того, что в соответствии с нормативными требованиями выбросы в атмосферу не могут превышать 10 г/Нм^3 , необходимо, чтобы трубка Вентури обеспечивала снижение содержания пыли не меньше чем на 99,5 %. Этого можно добиться только при потерях напора выше 100 мбар, иначе потребуются дополнительная обработка с помощью электростатического влажного фильтра, циклонных сепараторов или горячих электростатических фильтров FES (от фр. *Filtere électrostatique*) (см. схемы 2 и 3 на рис. 34), в последнем случае снижается также количество «зольных» вод, которые необходимо отстаивать и выводить из системы.

■ Загрязнение галогенами (Cl^- и F^-)

Загрязнения галогенами очень легко удаляются из системы мокрой очистки (с помощью трубки Вентури и мокрым скруббером) благодаря высокой растворимости анионов Cl^- и F^- . Однако в результате этого процесса среда в контуре промывных вод, которые циркулируют по трубке Вентури и по первому промывному аппарату, приобретает кислый характер, что необходимо учитывать при выборе оборудования и материалов конструкции. Из такой кислой среды необходимо удалять основную часть HgCl_2 , а также регулировать уровень кислотности добавлением соляной кислоты.

■ Загрязнение серосодержащими веществами (SO_2 , SO_3)

Предпочтительный способ удаления серосодержащих загрязнений — это противоточная промывка разбавленным щелочным раствором (см. рис. 34, скруббер 2). Можно использовать известь, однако основным недостатком такой обработки заключается в необходимости приготовления известкового молока и в возможности возникновения отложений на скруббере. Эффективность удаления SO_2 зависит от значения pH, которое регулируется в зависимости от нормативных требований.

■ Загрязнение летучими тяжелыми металлами

Если предположить, что трубка Вентури в сочетании со скруббером не гарантирует соблюдения порогового содержания $0,05 \text{ мг/Нм}^3$ таких загрязняющих веществ из-за присутствия частиц ртути, то требуется дополнительная обработка, а именно:

- либо во влажном электростатическом фильтре;
- либо во втором скруббере со специальной насадкой, содержащей активированный уголь,
- либо с введением перекиси водорода в скруббер 1 (см. рис. 34)

■ Загрязнение нелетучими тяжелыми металлами

Загрязнения нелетучими тяжелыми металлами фиксируются на минеральных золах, но их вымываемая фракция растворима в кислой среде установки.

■ Загрязнения диоксинами и фуранами

Если необходимо обеспечить соблюдение предельного значения выбросов диоксинов и фуранов $0,1 \text{ нг/Нм}^3$, то существует два варианта обработки, а именно:

- введение порошкового угля в камеру насыщения в целях адсорбции диоксинов (уголь переходит в зольные воды);
- в скруббере с дополнительными насадками, содержащими активированный уголь

■ Обработка сливных жидкостей

- При мокрой очистке газов образуются сливные жидкости двух видов
- жидкость, собирающая минеральные загрязнения (порошкообразные вещества) Ее подвергают отстаиванию, в результате в осадке остаются влажные минеральные золи, которые должны быть удалены в соответствии с действующими требованиями, а отстаившаяся жидкость рециркулирует в технологический процесс очистки газов;
 - сливные жидкости от двух скрубберов, они должны проходить обработку на мини-очистных установках перед возвратом в голову очистного сооружения [это напоминает обработку жидкостей при десульфуризации дымовых газов (см гл 25, п 5 1), хотя в данном случае задача не так сложна] В результате образуется содержащий тяжелые металлы кек, который должен направляться в специальные технические центры первой категории по захоронению отходов (СЕТ 1 по французской классификации)

■ Клубы дыма

Для предотвращения появления клубов дыма существуют два решения (см рис 34):

- установка двойной системы теплообменников в начале и в конце линии мокрой очистки (принцип технологической линии 3),
- установка трубчатых теплообменников, которые будут генерировать теплый воздух на входе в камеру насыщения (теплый воздух смешивается с очищенными дымовыми газами, в результате чего газы нагреваются и выходят из зоны образования клубов дыма)

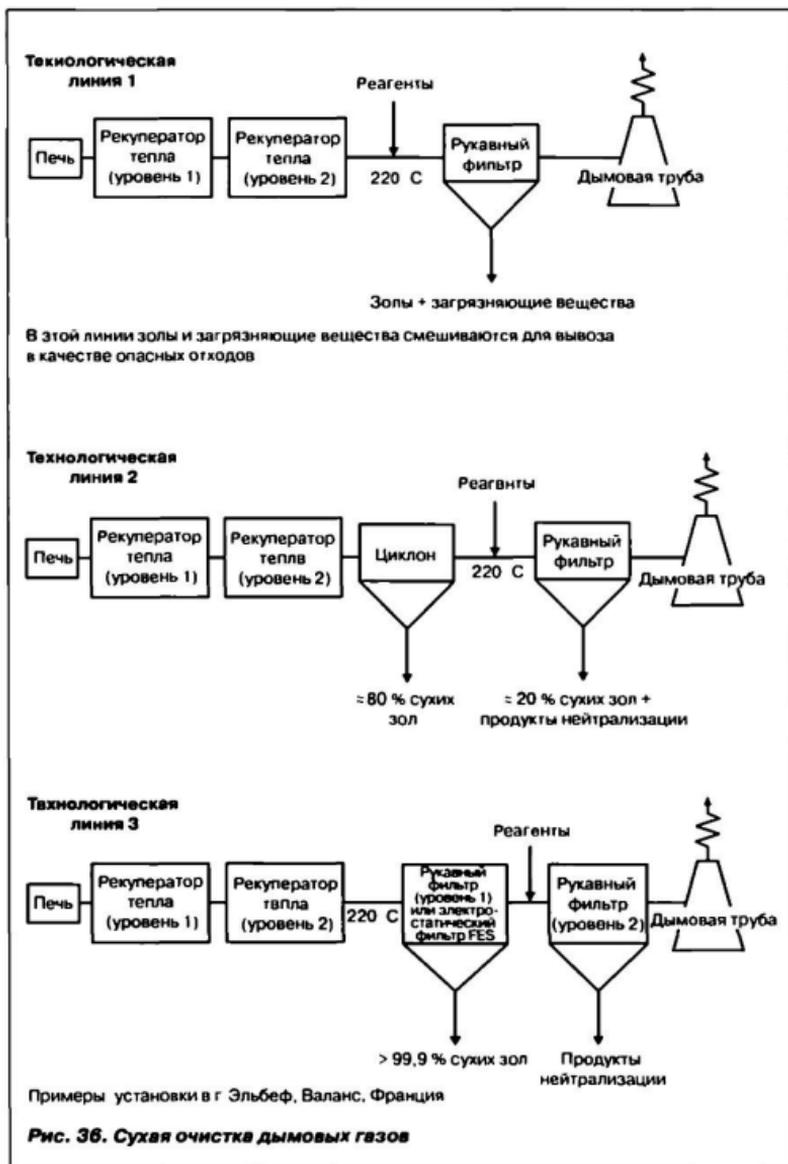
5.2.2. Сухой способ очистки

В отличие от мокрого способа при сухом способе очистки дымовые газы обрабатываются в том виде, в котором они появляются на выходе после энергетической утилизации, необходимой для обеспечения соответствия температуры газов применяемым технологиями Это предполагает наличие управляемой системы охлаждения, которая может быть либо непрямой (с помощью теплообменника), либо прямой за счет введения воздуха или распыления воды (это дает основание во многих нормативных документах называть такой метод полусухим)

Возможные технологические линии сухой очистки показаны на рис 36, в которых обрабатываются различные виды загрязнений

■ Пыль

- Пылевые загрязнения в основном отделяются на первой стадии очистки.
- **разделение в циклонном сепараторе** (см. рис. 36, линия 2) (или в **нескольких последовательных циклонах**), его преимущество в том, что оно не имеет жестких ограничений по температурному режиму Однако эффективность улавливания пыли очень сильно зависит от ее гранулометрических характеристик и изменяется от 50 до 90 %, поэтому циклонные сепараторы в основном применяют для обработки газов с небольшим содержанием пыли;
 - **сухой горячий электрофильтр** (см рис. 36, линия 3) при максимальной температуре около 350 °С, в зависимости от требуемого уровня задержания пыли данный электрофильтр может применяться для обработки различных газов, а эффективность задержания пыли изменяется от 98 до 99,5 %,
 - **рукавный (тканевый) фильтр**, представляет собой установку, которую можно рассматривать как **абсолютный фильтр**, гарантирующий содержание пыли



в очищенном газе ниже 10 мг/Нм^3 . В зависимости от типа рукавов температурные ограничения могут возрастать при непрерывном режиме работы для рукавов с тефлоновым покрытием ограничение составляет 220°C .

■ **Загрязнения галогенами, серосодержащими веществами, летучими тяжелыми металлами, диоксинами**

Такие загрязнения обрабатываются одновременно с помощью нейтрализующих реагентов

- бикарбоната натрия,
- извести,
- ПАУ,
- «сорбалита» (смеси извести и порошкообразного адсорбента).

Бикарбонат и известь нейтрализуют загрязнения, содержащие галогены и серу, а порошкообразный адсорбент поглощает летучие тяжелые металлы, диоксины и фураны. Учитывая реакционный принцип сухой обработки, а также короткое время пребывания реагентов в газовой среде, необходимо предусмотреть их избыток по сравнению со стехиометрическими расчетами. Увеличение дозы реагента может изменяться в зависимости от его вида в 1,5 раз — для бикарбоната натрия и в 3 раза — для извести. Необходимо отметить, что для проведения реакции с известью требуется только 1 моль извести, а для достижения такого же эффекта нейтрализации бикарбонатом натрия необходимо 2 моля этой соли.



- 1 Печь диаметром 2,3 м
- 2 Теплообменник
- 3 Рукавный фильтр

Фото 12. Печь с псевдооживленным слоем Thermyls-NTFB (установка в г. Эльбеф, Приморская Сена, Франция)

Необходимо также отметить, что

- применение бикарбоната натрия требует размещения специальной установки для складирования сырьевого материала, его размельчения и приготовления в целях обеспечения достаточной реакционной способности реагента,
- с учетом стоимости захоронения окончательных отходов в некоторых случаях может потребоваться установка для обработки образующегося кека, задача которой заключается в извлечении бикарбоната натрия. Водная фракция, возвращаемая в голову очистного сооружения, содержит только конечный остаток, состоящий в основном из адсорбента с тяжелыми металлами

■ Клубы дыма

Одно из преимуществ сухого способа обработки заключается в отсутствии появления клубов дыма (за исключением случая низких гидрометрических показателей и при температуре значительно ниже 0 °С)

На фото 12 показана установка в г. Эльбеф (Приморская Сена, Франция), в состав которой входит печь с псевдооживленным слоем **Thermylis-HTFB** диаметром 2,3 м (1), теплообменники (2) и два последовательных рукавных фильтра (3)

5.2.3. Полумокрый способ очистки

В данном случае речь идет о комбинации мокрого и сухого способов очистки с сохранением преимуществ и ограничением недостатков каждого из них

Мокрый способ очистки имеет два основных недостатка

- производство зольных вод регулируется нормативными требованиями, которые особенно жестки при высоком содержании зольного порошка (имеющем место при применении псевдооживленного слоя),

— необходимость обработки сливных жидкостей, образующихся на различных стадиях промывки газов

Сухой способ очистки также имеет два основных недостатка.

- необходимость охлаждения дымовых газов перед их вводом в технологическую линию обработки, при работе с тканевыми фильтрами такое кондиционирование нужно проводить обязательно,

— избыточные (по сравнению со стехиометрическими расчетами) количества реагентов, которые нужно вводить в систему сухой очистки, приводят к дополнительным эксплуатационным расходам

Чтобы компенсировать эти недостатки, применяют полумокрый способ (рис. 37), который фактически соответствует мокрому способу, но без образования сливной жидкости.

Полумокрый способ заключается в том, что перед мокрой обработкой (скрубберами) устанавливается реакционная башня, в которую впрыскивается суспензия, тут же подвергаемая испарению. Работа системы возможна только в том случае, если сухое тепло дымовых газов позволяет компенсировать энергию испарения и выпарить воду, содержащуюся в суспензии. Кристаллизирующиеся соли уходят вниз этой башни или проходят очистку в рукавных фильтрах. Такой принцип очистки подходит только к **дымовым газам, которые содержат незначительное количество пыли**. Таким образом, полумокрый способ может применяться при пиролизе осадков (в этом случае он является более экономичным как по капитальным затратам, так и по эксплуатационным расходам), но не подходит к технологии их сжигания в псевдооживленном слое

Чтобы адаптировать систему полумокрой очистки к обработке дымовых газов с высоким содержанием пыли, необходимо перед башней установить устройство

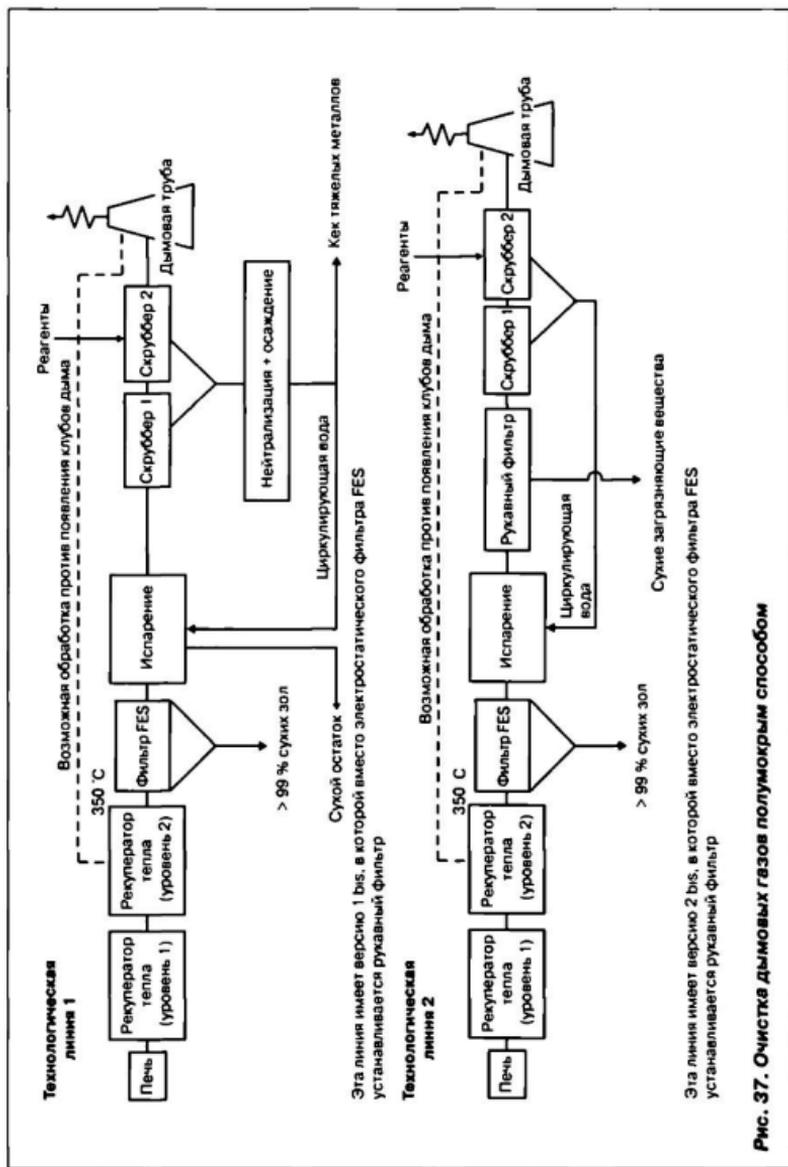


Рис. 37. Очистка дымовых газов полумокрым способом

очистки от пыли, например горячий электростатический фильтр (см технологические линии 1 и 2 на рис 37)

5.2.4. Обработка загрязнений, содержащих оксиды азота

Несмотря на все свои преимущества, описанные выше способы не обеспечивают удаления загрязнений, содержащих оксиды азота NO_x . Для этого любой способ следует дополнить технологическим решением, которое бы создавало условия для взаимодействия между аммиачным раствором и оксидом азота в соответствии со следующей общей реакцией:



Катализ реакции можно вызвать двумя способами

- при высоких температурах (около $900\text{ }^\circ\text{C}$) с помощью **гомогенного катализа**, называемого SNCR (см п 5 1),
- при низких температурах ($200\text{--}300\text{ }^\circ\text{C}$) с помощью **гетерогенного катализа**, называемого SCR (см п. 5 1), катализатор находится на неподвижном слое носителя, имеющем вид пчелиных сот, через который проходят дымовые газы

Способ гомогенного катализа, если технология термической обработки осадков позволяет его использовать, очень прост в применении. Достаточно впрыскивать аммиачный раствор или соль мочевины в ту реакционную зону, где температура дымовых газов достигает $900\text{ }^\circ\text{C}$. При мокрой очистке весь возможный избыток NH_3 будет автоматически нейтрализован. При работе в сухой системе очистки возможна установка скруббера на выходе из рукавного фильтра, но, к сожалению, при этом теряются особые преимущества, свойственные сухому способу обработки газов (например, отсутствие клубов дыма и т. д.)

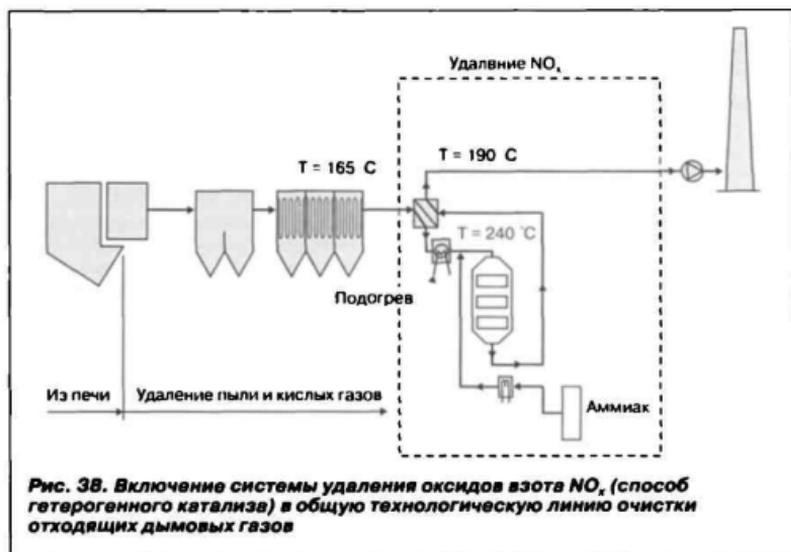


Рис. 38. Включение системы удаления оксидов азота NO_x (способ гетерогенного катализа) в общую технологическую линию очистки отходящих дымовых газов

При самостоятельном сжигании осадков в печи с псевдоожиженным слоем приятно соблюдать уровень выбросов 200 мг/м^3 , не проводя специальную очистку от оксидов азота. Если характеристики осадков и рабочие условия не позволяют обеспечить этот предельный уровень выбросов, то практический опыт показывает, что можно с полным основанием исходить из предположения, что снижение содержания NO будет составлять 50 %. Если 50%-го снижения концентрации оксидов азота оказывается недостаточно для того, чтобы обеспечить соблюдение действующих норм, то необходимо применить способ гетерогенного катализа.

Установить систему гетерогенного катализа намного сложнее. Она должна располагаться в конце технологической линии обработки дымовых газов, так как время действия катализатора значительно сокращается при контакте с загрязнениями (особенно с SO_2) неочищенных газов. При работе по мокрому или полумокрому способу обработки дымовых газов применение этой системы требует

- монтажа группы масляных термических теплообменников, предназначенных для отбора энергии, содержащейся в поступающих дымовых газах, чтобы вернуть ее в конец линии для нагревания газов до температуры, требуемой для проведения процедуры гетерогенного катализа (для сухого способа обработки установки такой системы не требуется),
- установки второго отсасывающего вентилятора, что обусловлено большой потерей напора,
- установки вспомогательной горелки для точного управления температурой реакции,
- как и для способа гомогенного катализа, предусмотреть систему хранения аммиачного раствора или соли мочевины.

На рис. 38 показана работа системы гетерогенного катализа при сухом способе обработки дымовых газов.

6. Разложение органических веществ с помощью жидкофазного окисления

Существует группа методов окисления O_2 осадка, которая позволяет избежать проблем, обычно возникающих при термической обработке и усложняющих дальнейшую технологическую линию обработки дымовых газов. Эту группу методов объединяют под общим названием жидкофазного окисления (OVH — от фр. *oxydation en voie humide*), поскольку действительно жидкие осадки сжигаются без пламени.

Методы жидкофазного окисления различаются в зависимости от расположения рабочей зоны, характеризующейся давлением и температурой, по отношению к критической точке воды: 221 бар, 373°C (рис. 39).

Зоне ниже критической точки на рис. 39 соответствует **подкритическое жидкофазное окисление**. Эта технология была создана в 50-х гг. для обработки осадков и черных щелоков: кислород, растворенный в жидкой фазе, вступает в реакцию с органическими соединениями. При обработке осадков давление может варьироваться от 40 до 100 бар.

Зоне выше критической точки соответствует **сверхкритическое жидкофазное окисление**, при котором растворимостью органических компонентов, а также газов (кислорода) можно пренебречь. Предполагается, что процесс проходит в монофазном режиме, т. е. без стадии переноса кислорода. Таким образом удается добиться очень высокого уровня разложения O_2 (> 99 %) за очень короткий промежуток времени (около 1 мин). Однако применение этого метода имеет ряд трудностей,



связанных с ограничениями по давлению, а также с выделением в осадок минеральных и практически нерастворимых солей. Образование осадка также вызывает проблемы коррозии, особенно при наличии веществ, содержащих хлор. В настоящее время обработка осадков по сверхкритическому методу является экспериментальной, поэтому остановимся на рассмотрении разработанного компанией «Дегремон» подкритического способа **Minerals**.

6.1. Общее описание подкритического жидкофазного окисления

Подкритическое жидкофазное окисление проводится в реакторах, которые могут работать при температурах, изменяющихся в интервале 220–320 °С, и при давлении от 40 до 110 бар. Рабочее давление поддерживается на уровне, несколько превышающем давление водяного пара, в этих условиях реакция происходит в жидкой фазе.

В зависимости от температурного режима для проведения окисления может потребоваться применение катализатора, при этом время реакции будет составлять от 30 до 120 мин. Для того чтобы обеспечить автотермичность реакции, количество загрязнений, поступающих в реактор и характеризующихся параметром ХПК, должно превышать 25 г/л, что может потребовать проведения предварительного сгущения осадков.

Позтому жидкофазное окисление применяется при обработке концентрированных, но не обезвоженных осадков (рис. 40). Результаты окисления можно представить следующим образом:

- 80 % ОВ минерализуются в виде CO_2 и H_2O , оставшиеся 20 % растворяются в виде органических соединений, имеющих простую структуру и легко поддающихся



Рис. 40. Жидкофазное окисление

ся биологическому разложению (для которого рекомендуется использовать уксусную кислоту).

— сера, фосфор, хлор и азот, содержащиеся в ОБ осадков, превращаются соответственно в ионы SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Cl и NH_4^+

Таким образом, в результате данного процесса окисления образуются

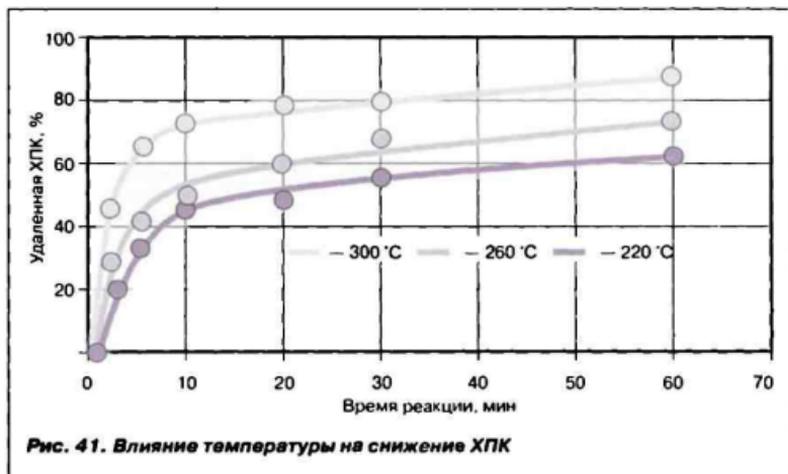
— газ, состоящий в основном из CO_2 и водяного пара, а также из органического углерода и летучих органических компонентов. Такой газ свободен от пыли и содержит крайне незначительные количества SO_2 , NO_x , диоксинов и фуранов. Газ обрабатывается каталитическим окислением в целях удаления перед выбросом в атмосферу органического углерода и летучих ОБ.

— жидкость, содержащая в основном ВВ, минеральные и органические растворимые вещества, а также гидроксид аммония, образовавшийся в результате окисления органического азота. Такая жидкость должна пройти осветление отстаиванием, которое помогает отделить осадок для последующего обезвоживания на фильтр-прессе без кондиционирования. Получаемый ке́к состоит в основном из минеральных веществ, включая **тяжелые металлы, находящиеся в стабилизированной и невывмываемой форме и легко транспортируемые** на захоронение (конечный отход). Кроме того, осадок может содержать небольшое количество ОБ, которое уменьшается при увеличении температуры.

6.2. Способ *Minéralis* подкритического жидкофазного окисления

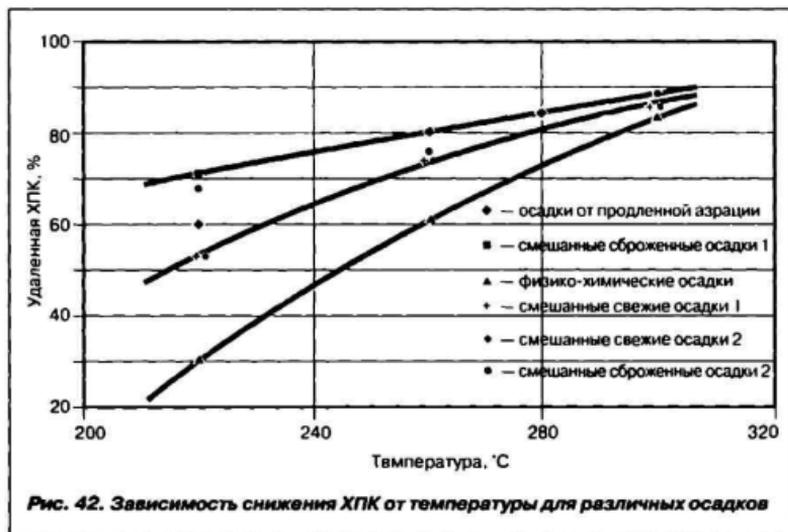
6.2.1. Выбор температуры и давления

Для определенного типа осадков температурные условия будут оказывать значительное влияние на эффективность снижения ХПК (рис 41). На рис 42 показано, что для большинства осадков при повышении температуры от 220 до 300 °С сниже-



ние величины ХПК составляет 20–40 % (при одинаковой продолжительности реакции), и в этом интервале температур разница в эффективности обработки различных видов осадков становится незначительной.

Как и в любой химической реакции, кинетика окисления возрастает с увеличением температуры. Кроме этого растет и растворимость кислорода — приблизительно



но на 150 % при повышении температуры с 250 до 350 °С (рис. 43), вследствие чего кинетика реакции окисления еще более возрастает.

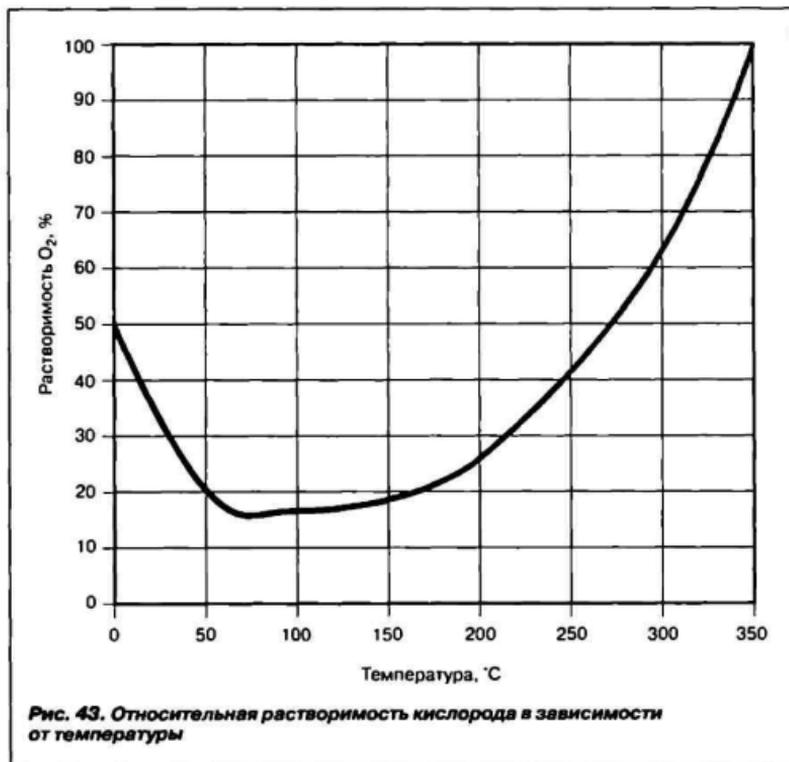
Наконец, закон Гей-Люссака (закон теплового расширения газов) в применении к системе жидкофазного окисления может быть представлен следующим образом

$$P_{\text{общее}} = P_{\text{паров H}_2\text{O}} + P_{\text{сухого газа}}$$

и

$$\frac{\text{Расход водного пара}}{\text{Расход кислорода}} = \frac{P_{\text{паров H}_2\text{O}}}{P_{\text{сухого газа}}} = \frac{P_{\text{паров H}_2\text{O}}}{P_{\text{общее}} - P_{\text{паров H}_2\text{O}}}$$

Поэтому для определенного расхода кислорода (связанного с количеством окисленных ОВ) можно сказать, что чем выше будет общее давление, тем меньше воды будет испаряться (что снижает энергозатраты). В силу вышеуказанных причин компания «Дегремон» применяет способ *Minerals* с рабочей температурой около 300 °С для жидкофазного окисления большинства осадков



6.2.2. Выбор окислителя

Для окисления ОВ осадка можно использовать различные типы сильных окислителей (перекись водорода, озон, чистый кислород), но по экономическим соображениям выбирают только воздух и кислород

Надо отметить, что при применении воздуха возникают три основные проблемы

- необходимость работы при более высоком общем давлении, чем при использовании чистого кислорода,
- генерирование более значительных количеств постоянных газов (носителей азота), что повышает риски термического образования оксидов азота NO_x ,
- большее электропотребление для проведения компрессии и повышенные затраты на техническое обслуживание компрессоров

Все это объясняет тот факт, что в последнее время в качестве окислителя в основном используется кислород, в частности в способе **Minerals**

6.2.3. Катализаторы

Катализаторы могут применяться для снижения температуры в реакторе жидкофазного окисления. Металлические катализаторы ($CuSO_4$) должны смешиваться с жидкостями, подлежащими обработке, еще до входа в реактор. Однако, по мнению компании «Дегремон», нецелесообразно использовать дорогостоящие катализаторы, а также катализаторы, вызывающие образование побочных минеральных продуктов, которые содержат высокие концентрации металлов, поскольку это затрудняет дальнейшую утилизацию отходов

6.3. Специфика процесса по способу **Minerals**

Схема процесса по способу **Minerals** показана на рис. 44

6.3.1. Концентрация осадков (по СВ и ХПК), поступающих в систему жидкофазного окисления

Способ **Minerals** позволяет работать с осадками различной концентрации, что дает возможность обрабатывать разнообразные осадки и отвечать самым разным запросам. Тем не менее концентрация осадков по ВВ не должна превышать 100 г/л из-за риска

- увеличения потери напора в теплообменниках,
- снижения обменной способности теплообменника для нагревания осадков

Как было показано выше, поступающие осадки должны иметь минимальный уровень НТС, т. е. величина ХПК должна составлять не менее 25 г/л, так как выше этого уровня процесс становится автотермичным. При более высоком содержании ХПК поступающих осадков (от 50 до 80 г/л) термический баланс установки становится экзотермическим, и следовательно, можно планировать проведение утилизации тепла в виде пара. В противном случае тепло может быть рассеяно в атмосфере. Но в любом случае концентрация по ХПК не должна превышать максимального значения 120 г/л, так как при превышении этого уровня становится трудно регулировать температуру

6.3.2. Реактор без разделения стадий процесса

Процесс окисления осадка проходит в реакторе колонного прямооточного типа, в котором создается восходящий поток пузырьков воздуха. В реакторе имеется толь-

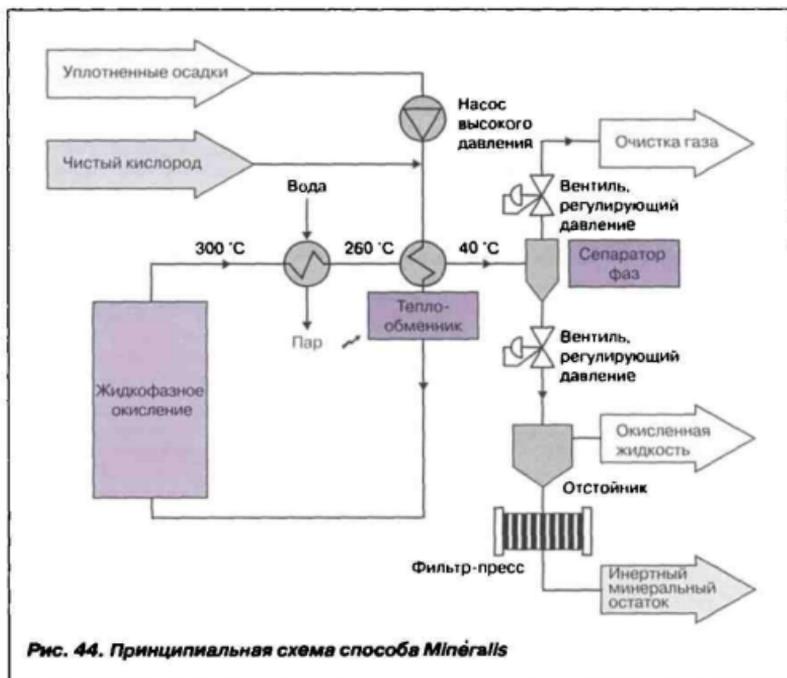


Рис. 44. Принципиальная схема способа Minéralls

ко один выход. Такая конструкция за счет своих гидродинамических параметров обеспечивает отличную однородность температур. Кроме того, она позволяет провести охлаждение всех отходящих продуктов до падения давления и разделения фаз.

Выбор технологического решения, которое позволяет разделять фазы при низких температурах, имеет большое значение для обеспечения безопасности процесса, так как в реакторе не образуется «газовых мешков» и, следовательно, нет рисков расширения газов. Кроме того, это позволяет избежать возгонки металлов и испарения воды, так как спад давления происходит при низкой температуре, а также предотвратить образование отложений коррозионных солей (сульфатов, хлоридов и т. д.) на стенках реактора в газовой зоне и, таким образом, не допустить коррозии стенок. Наконец, данная конструкция позволяет последовательно располагать несколько реакторов, что является особым преимуществом при работе с установками, предназначенными для обработки больших объемов осадков.

6.3.3. Разделение твердой и жидкой фаз

При падении давления твердый остаток отделяется от жидкости путем отстаивания, а затем проходит обезвоживание на фильтр-прессе без химического кондиционирования. Промывка минерального кека также может способствовать снижению содержания ОВ.

Последняя стадия процесса состоит в **дочистке жидкой фазы**, отделенная жидкость характеризуется высоким содержанием биоразлагаемой ХПК и аммиака ХПК формируется в основном за счет уксусной кислоты (чем выше температура реакции, тем выше ее содержание), которую затем возвращают в головную часть очистного сооружения и вторично используют для денитрификации. Однако кроме ХПК необходимо учитывать и связанный с ней гидроксид аммония, который значительно затрудняет рециркуляцию, так как ХПК нужно будет использовать для денитрификации нитратов, образующихся из аммиачной группы. Таким образом, целесообразно удалять аммиак до возврата жидкости в голову очистного сооружения.

6.4. Отделение аммиака

Отделение аммиака является одним из важнейших процессов в технологии жидкофазного окисления. Проводить его можно либо внутри реактора, либо вне его.

6.4.1. Отделение внутри реактора

Для отделения аммиака внутри реактора требуется использовать специальный катализатор и/или проводить его отгонку.

Гетерогенный катализатор, который позволяет проводить окисление $\text{NH}_3 \rightarrow \text{NO}_3$, сильно подвержен влиянию температуры, а его эффективность может заметно снижаться при загрязнении некоторыми примесями исходных осадков. Кроме того, когда катализатор исчерпает свой ресурс, то для его замены придется останавливать реактор.

Проводить отгонку аммиака можно только в реакторе с разделением фаз, при этом давление должно быть ниже давления водяного пара при рабочей температуре, чтобы оптимизировать переход аммиака в газовую фазу. Такая отгонка требует повышенного значения рН и, следовательно, необходимости введения соды в систему. Таким образом, реакция отгонки не может проходить до конца, и эффективность отделения при данном способе значительно ниже по сравнению с результатами, получаемыми при проведении этого процесса вне реактора. Окисленная жидкость все еще содержит значительные количества ионов NH_4^+ — выше 500 мг/л, нередко это значение достигает 700–800 мг/л. Кроме того, аммиак переходит в газовую фазу, которая должна также подвергаться обработке в целях соблюдения норм по выбросам токсичных веществ в атмосферу.

В силу вышеизложенных причин компания «Дегремон» остановила свой выбор на отделении аммиачного азота реактора.

6.4.2. Отделение вне реактора

Можно предложить два достаточно проверенных технических решения — биологическую обработку и физико-химическую обработку.

■ Биологическая обработка

Окисленная жидкость после отделения минерального остатка и охлаждения проходит обработку в отдельной биологической установке, включающей нитрификацию и денитрификацию. При этом в состав установки жидкофазного сжигания необходимо включать дополнительные емкостные сооружения, что в большинстве случаев является нецелесообразным с экономической точки зрения.

■ Физико-химическая обработка

Физико-химическая обработка (рис. 45) проводится в две стадии

- отгонка аммиака при щелочном значении pH (добавление соды) в колонне, в которую вводится пар или воздух (см. гл. 16, п. 1),
- каталитическое удаление аммиака и летучих ОВ, проводимое отгонкой в две стадии.
 - превращение NH_3 в N_2 с помощью специального катализатора в первом контактном аппарате,
 - разложение летучего органического углерода на CO_2 и H_2O с помощью второго специального катализатора, размещаемого во втором контактном аппарате.

Такое техническое решение было разработано для обработки газов с **высоким содержанием аммиака** и успешно проверено на очистных сооружениях в г. Орб (Франция). Оно обеспечивает снижение концентрации аммиака до 150 мг/л и менее, что позволяет сохранить биоразлагаемую ХПК и способствует денитрификации или биологическому извлечению фосфора на основном очистном сооружении.

Разделение реакций окисления ХПК и аммиака имеет ряд серьезных преимуществ, среди которых можно упомянуть следующие

- так как отгонка проводится при низкой температуре ($< 80^\circ\text{C}$), то металлы практически не возгоняются вместе с образующимся паром, что способствует продлению срока службы стационарных аппаратов с катализаторами (более 3 лет), которые используются для окисления аммиака,
- кислород, необходимый для превращения аммиака в газообразный азот, поставляется с воздухом, а не вводом чистого кислорода, последний вариант при-



Рис. 45. Отгонка аммиака и каталитическое окисление NH_3 и летучих ОВ

На рис. 46 и 47 показано включение способа *Minéralis* с отделением аммиака вне реактора и с применением каталитических реакций в технологическую линию очистных сооружений, рассчитанных на 40 000 ЭЖ, приведены соответствующие значения параметров обработки сточных вод и материальный баланс жидкофазного окисления

6.5. Меры безопасности при проектировании

В технологической линии жидкофазного окисления осадков необходимо предусмотреть установку теплообменников, способных выдерживать постоянные нагрузки (их частота зависит от типа обрабатываемых осадков)

Применение чистого кислорода влечет за собой необходимость учесть строгие правила безопасности, а также использовать только надежное и безопасное оборудование

Выбор оборудования, особенно клапанов и насосов, должен соответствовать ограничениям, связанным с высоким давлением в присутствии абразивных веществ

7. Нормативные документы

7.1. Французское законодательство

Комплекс описанных выше технологий обработки обезвоженных осадков подпадает под действие нормативных документов, относящихся к сооружениям ICPE (от фр. *Installations Classées pour la Protection de l'Environnement* — сооружения и установки для охраны окружающей среды), которые определены законом от 19 июля 1976 г. (см также гл. 2, п. 6.3.3.1)

7.1.1. Административная система для контроля за работой сооружений ICPE

Во Франции административная система организаций, контролирующая работу очистных сооружений и установок ICPE, относится к ведомству Министерства по благоустройству территорий и окружающей среды, которое курирует два основных административных управления по охране окружающей среды, непосредственно связанной с сооружениями очистки сточных вод и обработки осадков, производимыми очистными сооружениями, а именно Управление по воде и Управление по предотвращению загрязнений и рисков (DPPR)

Если очистные сооружения контролируются в целом Управлением по воде, то установки по обработке осадков в зависимости от применяемых технологий и оборудования подпадают в группу ICPE и относятся к компетенции Управления DPPR.

Задача Управления DPPR состоит в том, чтобы сократить выбросы загрязняющих веществ и риски, связанные с их пагубным влиянием на окружающую среду. Данное управление выполняет требования, определенные Министерством по благоустройству территорий и окружающей среды, которые относятся к оборудованию, классифицированному для защиты окружающей среды

В структуре DPPR существуют две службы, которые непосредственно отвечают за весь комплекс процессов, связанных с термической обработкой осадков, а именно

- подразделение SDPD (от фр *Sous-direction des produits et des déchets* — подразделение продуктов и отходов), задача которого состоит в оценке загрязнений и рисков, генерируемых продуктами очистных сооружений, содействии снижению количества производимых отходов и созданию условий для экологичного уничтожения отходов, а также в установлении соответствующих норм и правил, относящихся к перемещению таких отходов,
- служба SEI (от фр *Service d'environnement industriel* — служба по защите среды вокруг промышленных объектов) Основная задача этой службы заключается в содействии сокращению и предупреждению загрязнений и их вредного влияния на окружающую среду. В этой связи на службу SEI возлагается задача контроля за соблюдением норм, относящихся к сооружениям ICPE, выдача региональным управлениям по промышленности, исследованиям и защите окружающей среды (DRIRE) инструкций и предписаний, которые должны выполняться промышленными предприятиями

7.1.2. Основные принципы регламентации работы сооружений ICPE

Французское законодательство устанавливает простую систему работы сооружений ICPE. Промышленные работы, подпадающие под действие этого законодательства, перечислены в специальной номенклатуре, которая предписывает получение разрешения или подачу декларации

- **декларация** (которая, в сущности, является уведомлением) касается наименее загрязняющих и опасных видов промышленной деятельности. Цель подачи декларации заключается в том, чтобы довести до сведения префекта факт проведения определенных промышленных работ, а также подтвердить готовность соблюдать нормативные требования (префект в свою очередь выдает подтверждение получения декларации),
- **разрешение** выдается для самых загрязняющих и опасных видов промышленной деятельности. Процедура выдачи разрешения начинается с составления **пакета документов для подачи заявки на получение разрешения**, в который включается **отчет об исследовании влияния** данной деятельности на окружающую среду, а также отчет об изучении рисков. Затем этот пакет документов направляется на рассмотрение в префектурные службы. Документы проходят разнообразные проверки, а затем их выносят на публичное обсуждение (опрос общественности). Процедура завершается выдачей (или отказом в выдаче) разрешения в форме постановления префекта, которое содержит нормативные предписания (например, в отношении сбросов и выбросов могут указываться предельные значения концентраций и потоков загрязняющих веществ), которые должны соблюдаться при данном промышленном производстве

Процедура выдачи разрешения представляет собой довольно сложный процесс, который занимает как минимум 9 мес.

7.1.3. Регламентация работы сооружений ICPE для термической обработки осадков

В целом вышеописанные промышленные технологии требуют как подачи декларации, так и получения разрешения

■ Термическая сушка

Основные разделы специальной номенклатуры сооружений ICPE для проведения термической сушки

- раздел 322А «Складирование и обработка бытовых отходов и других городских отходов» Этот раздел предписывает необходимость прохождения **процедуры получения разрешения** с санитарной зоной 1 км,
- раздел 167А, аналогичен разделу 322А, но применяется для случаев обработки промышленных осадков,
- раздел 2915-2 «Технологии нагрева, использующие теплоноситель».
 - если теплоносителем является минеральное масло, используемое при температуре ниже температуры воспламенения, то достаточно подачи декларации;
 - если используется синтетическое масло, то необходимо проходить процедуру получения разрешения

■ **Сжигание в псевдооживленном слое, пиролиз и жидкофазное окисление**

Эти технологии относятся к разделам 322В и 167С в зависимости от происхождения осадков. Для работы с применением таких технологий необходимо получить разрешение с размещением в радиусе 2 км средств предупреждения о наличии данного производства.

Согласно разделу 220 «Складирование и использование кислорода (специально для технологии жидкофазного окисления)» в зависимости от количества складироваемых осадков необходимо проходить процедуру подачи декларации или получения разрешения.

7.2. Европейские нормативные документы, касающиеся сжигания (выписки)

Европейское законодательство устанавливает специальные требования, которым должны соответствовать установки по обработке и сжиганию осадков или отходов. В табл. 14 перечислены технические нормативные ограничения, которые последовательно вводились в действие, при этом Постановление от 20 сентября 2002 г. вводит во французское право последние европейские директивы. Таким образом, как видно из таблицы, эти требования ужесточились.

Таблица 14
Сжатие осадков (сравнение текстов различных нормативных документов)

Требуемые измерения	Постановление от 25 января 1991 г	Европейская директива от 28 декабря 2000 г	Постановление от 20 сентября 2002 г
<p>Постоянные измерения</p> <p>Лечь</p> <p>Дымовые газы</p>	<p>Только при пропускной способности по отходам > 1 т/ч</p> <p>Температура</p> <p>Общее содержание пыли</p> <p>CO</p> <p>O₂</p> <p>HCl</p> <p>H₂O, кроме измерений на высушенных газах</p>	<p>Температура</p> <p>Температура</p> <p>Давление</p> <p>Общее содержание пыли</p> <p>CO</p> <p>CO₂</p> <p>O₂</p> <p>HCl</p> <p>HF, только если не проводится удаление HCl</p> <p>SO₂</p> <p>NO_x, если есть установленные предельные значения</p> <p>H₂O, кроме измерений на высушенных газах</p>	<p>Температура</p> <p>Общее содержание пыли</p> <p>CO</p> <p>CO₂</p> <p>O₂</p> <p>HCl</p> <p>HF, только если не проводится удаление</p> <p>HCl</p> <p>SO₂</p> <p>NO_x</p> <p>H₂O, кроме измерений на высушенных газах</p>
Периодические измерения			
Период	1 раз в год	2 раза в год, в первый год — каждые 3 мес	2 раза в год, в первый год — каждые 3 мес
Организация	Независимые замеры		
Измерение	<p>Общее содержание пыли</p> <p>HF (кроме расходов < 1 т/ч)</p> <p>HCl</p> <p>CO</p> <p>CO₂</p> <p>SO₂ (кроме расходов < 1 т/ч)</p> <p>Тяжелые металлы (кроме расходов < 1 т/ч)</p>	<p>HF, если такие измерения не производятся в постоянном режиме</p> <p>Тяжелые металлы</p> <p>Диоксиды, фураны</p>	<p>Ряд параметров, которые измеряются постоянно</p> <p>HF, если такие измерения не производятся в постоянном режиме</p> <p>Cd</p> <p>Pb</p> <p>Hg</p> <p>Общее содержание других металлов (Sb + As + Pb + Co + Cu + Mn + Ni + V)</p> <p>Диоксиды, фураны</p>



Глава

20

-
1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ 1349
 2. ДОЗИРОВАНИЕ ЖИДКИХ РЕАГЕНТОВ..... 1356
 3. ХРАНЕНИЕ И ДОЗИРОВАНИЕ СЫПУЧИХ РЕАГЕНТОВ 1356
 4. ПРИГОТОВЛЕНИЕ СУСПЕНЗИИ И РАСТВОРОВ ИЗ ПОРОШКОВЫХ И ГРАНУЛИРОВАННЫХ РЕАГЕНТОВ 1360
 5. ХРАНЕНИЕ, ДОЗИРОВАНИЕ И РАСТВОРЕНИЕ ГАЗООБРАЗНЫХ РЕАГЕНТОВ 1373
 6. ОСОБЫЕ РЕАГЕНТЫ 1379

Хранение и подача реагентов

При обработке и очистке **воды** используются различные химические реагенты специального назначения

- специфические
 - коагулянты — соли алюминия, железа и др .
 - окислители или дезинфектанты — хлор и др .
 - флокулянты — полиэлектролиты, добавки и др .
 - адсорбенты — активированный уголь и др .
- общего назначения
 - щелочи — каустическая сода, известь и др .
 - кислоты — серная, соляная и др .

В гл. В, п. 3, приведены основные характеристики большого числа реагентов

• Общие положения

.1. Упаковка и подготовка реагентов

Упаковка и подготовка реагентов зависят, в частности

- от их состояния (твердое, жидкое, газообразное),
- от их свойств (агрессивность, сохранность),
- от способа их транспортировки — в упаковке (невозвратная или возвратная тара) или без упаковки.

- от способа разгрузки и складирования (цистерны, бункеры и контейнеры для средних и значительных количеств, биг-баги для средних количеств, мешки, бочки и канистры на поддонах для небольших количеств)

Наиболее распространенные виды упаковки

- жидкие реагенты
 - полиэтиленовые бочки и канистры на 20 и 30 л,
 - прямоугольные пластмассовые контейнеры на 800 л, которые перемещают вилочными погрузчиками. Эти емкости могут опорожняться сверху с помощью сифонов, либо под действием силы тяжести (через отверстие, прокалываемое в нижней части, снабженной стандартным устройством быстрого подсоединения диаметром 50 мм — для гибких шлангов), либо, наконец, отбором под давлением сжатого воздуха (максимум 1 бар).
- твердые реагенты
 - мешки по 25 или 50 кг на поддонах,
 - бочки металлические, пластмассовые или из картона (например, для безводного хлорного железа),
 - контейнеры большой емкости (биг-баги — см фото 1 и 2),
- газообразные реагенты
 - сжиженные газы (хлор, аммиак, углекислый газ) хранятся под давлением в металлических баллонах (вертикальных) или цистернах (горизонтальных) (рис 1). Жидкость и газ находятся в равновесии под давлением насыщенного пара, соответствующем температуре реагента (6–9 бар при 20 °С для хлора и аммиака, 20 бар при 20 °С для углекислого газа),
 - из баллонов отбирают только газ. Их используют только в **вертикальном положении**. Из верхней части **горизонтальной цистерны** допускается либо отбор газа (используется только верхний кран из двух, расположенных на од-



Фото 1. Контейнер биг-баг. Размеры: примерно 1х1х1 м. Емкость: от 500 кг до 1 т. Прочная оболочка из плетеного полиэтилена. Опорожнение под действием силы тяжести через дно



Фото 2. Аспиратор для опорожнения биг-багов

ной вертикали), либо жидкости из нижней части для направления значительно ее количества в испаритель

1.2. Размещение

Общее расположение складов, приготовление, дозирование и подача реагентов осуществляются с учетом следующих рекомендаций

1.2.1. Хранение реагентов

При хранении на складах должна обеспечиваться хорошая сохранность реагентов при морозе, жаре, на свету или при непогоде. Следует учитывать, что

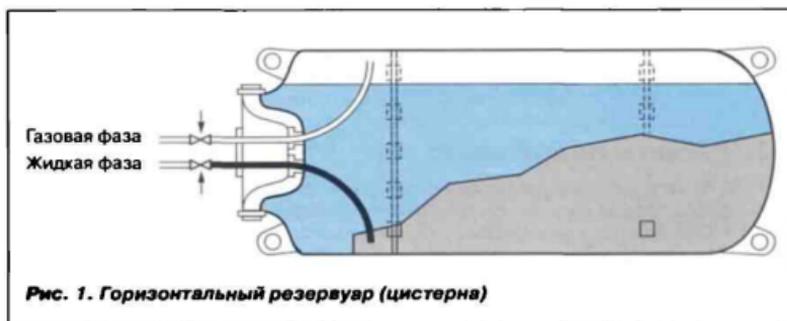


Рис. 1. Горизонтальный резервуар (цистерна)

- жавелевая вода (раствор гипохлорита натрия) разрушается под действием солнечного света или тепла;
- концентрированные растворы каустической соды кристаллизуются при комнатной температуре. Соответствующие цистерны должны устанавливаться в отапливаемых помещениях или обогреваться (50%-й раствор каустической соды кристаллизуется при 10 °С — см кривую кристаллизации на рис. 20 гл 8, п. 3);
- при хранении и транспортировке кристаллического хлорного железа ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) нужно избегать температур, превышающих 37 °С, при которых это вещество плавится, и охлаждать его перед взятием больших количеств,
- места хранения хлора должны быть защищены от света, особенно в теплых странах. В частности, при 70 °С в результате расширения жидкости уменьшается свободное пространство в верхней части резервуара, возникает риск разрыва последнего и затем испарения газообразного хлора (смертельно опасного). Помещения должны быть отапливаемы зимой, так как поступление тепла извне необходимо
- для поддержания равномерности подачи газа при его откачке,
- для того чтобы избежать образования в трубах жидкости, нарушающей работу хлораторов

1.2.2. Удобство эксплуатации

Предпочтительна выгрузка реагентов под действием силы тяжести, особенно это касается сыпучих веществ.

Исключение места хранения жидких опасных реагентов (кислоты и основания) не должны, кроме особых случаев, располагаться на высоте, и особенно над зоной нахождения персонала или занятой оборудованием

Нежелательно также размещение трубопроводов с коррозионно-активными продуктами над электрооборудованием (двигателями и шкафами управления).

1.2.3. Меры предосторожности

Помещения для хранения хлора должны быть удалены и, как минимум, отделены от других частей сооружений.

Помещения для хранения извести и порошкового активированного угля (ПАУ) обязательно должны быть изолированы перегородками, двери и окна должны быть непроницаемыми, а помещения снабжены установками вытяжки и фильтрации загрязненного воздуха

Любые процессы автоматического приготовления порошковых флокулянтов должны происходить в помещениях, защищенных от влаги, так как твердые флокулянты сильногигроскопичны

Электрические распределительные шкафы устанавливаются в местах, защищенных от влаги и пыли сыпучих реагентов.

1.3. Расчеты по хранению

При определении размеров площадей и емкостей хранения (цистерны, бункеры) следует исходить из возможностей местного снабжения.

Следует всегда стремиться:

- избегать опустошения склада (автономность), при этом нужно учитывать сроки поставок некоторых реагентов в различных странах;
- минимизировать транспортные расходы; размеры складов должны быть кратны емкости грузовиков или вагонов

Во Франции бóльшая часть обычных реагентов (известь, кислоты, раствор каустической соды, хлорное железо, сульфат алюминия и др.) может поставляться в грузовиках-цистернах емкостью порядка 24 т

Жидкий хлор поставляется

- в баллонах на 15, 30 и 50 кг,
- в цистернах на 500 (редко) и 1000 кг

Во Франции эти емкости маркированы на давление 30 бар специализированной службой Министерства горнорудной промышленности

1.4. Транспортировка и выгрузка

Выгрузка реагентов, упакованных на поддонах, не представляет собой особых трудностей при наличии вилочного погрузчика-подъемника и штабелеров

Выгрузка реагентов, доставленных навалом, более проблематична, но экономически оправдана для больших объемов поставок

- сыпучие продукты (известь, активированный уголь) выгружаются из грузовиков-цистерн пневматическим способом сверху в закрытые бункеры. Искользованный воздух очищается перед выбросом в атмосферу. Этот способ выгрузки позволяет избежать вредных воздействий, вызванных пылью, которая образуется при механической транспортировке, применяемой для очень неоднородных сыпучих реагентов (например, известь плохого качества),

- жидкие реагенты выгружаются либо под действием силы тяжести, либо под давлением воздуха, либо откачиванием. Грузовики-цистерны обычно оборудованы своим собственным компрессором или насосом

Из соображений безопасности выгрузку коррозионно-активных реагентов целесообразно осуществлять откачиванием насосом, а не пневматическим способом

1.5. Доступность

Правильность и точность дозирования реагентов влияют на эффективность процесса обработки воды

Здания, в которых расположены установки хранения, приготовления и подачи химических реагентов, должны быть легкодоступны для обслуживающего персонала. Должны обеспечиваться

- визуальный контроль
 - точек ввода реагентов,
 - надежной циркуляции наиболее важных реагентов,
- простая настройка и регулирование
 - средств дозирования,
 - контрольно-измерительных приборов (рН-метров, расходомеров);
- возможность растворения порошковых реагентов
 - сульфата алюминия,
 - гашеной извести,
 - флокулянтов,
- доступ для обслуживания и замены
 - клапанов насосов дозирования,
 - диафрагм, счетчиков, вентилей на трубопроводах,
 - трубок ввода реагентов,
- доступ для уборки помещений и оборудования:
 - сбор мочечных вод и протечек (необходим уклон пола и приямок для отбора);

- специальное покрытие против скольжения в зонах приготовления флокулянтов (вязкие растворы).

Доступность означает также соблюдение правил эргономики:

- удобный доступ для снятия показаний и управления аппаратурой «на уровне человеческого роста».
- наличие грузоподъемных средств для перемещения бочек и мешков с реагентами.

1.6. Применяемые материалы

В табл. 1 приведен обзор распространенных материалов емкостей, используемых для хранения жидких реагентов. Можно особо отметить следующее:

- пластмассы (ПВХ и в особенности полиэтилен) обычно используются для хранения коррозионно-активных жидкостей,
- армированный полиэстер хорошо подходит для бункеров с известью и других сыпучих продуктов в силу высокой химической и механической прочности, а также слабой шероховатости этого материала,
- низкоуглеродистая сталь благодаря невысокой стоимости и механической прочности может использоваться для резервуаров хранения большой емкости:
 - для раствора каустической соды концентрацией менее 47 % при температуре до 50 °C;
 - для концентрированной серной кислоты (не менее 92 % в отсутствии всяких следов влаги (вентиляционное отверстие, защищенное осушителем);
- сталь (даже нержавеющая) исключается для контактов со всеми обычными реагентами, содержащими хлор (хлорное железо, гипохлориты, соляная кислота и газообразный хлор в присутствии влаги)

1.7. Безопасность

Некоторые реагенты, используемые при обработке воды, являются опасными веществами (кислоты, щелочи, хлор, аммиак, озон и др.)

Хранение больших количества кислот, щелочей или хлора подчиняется очень строгим правилам, которые действуют в каждой стране.

Согласно предписаниям на складе, где хранится хлор, необходим комплект оборудования для его нейтрализации в случае утечки. Воздух, содержащий хлор, подается с помощью вентиляторов в поглотительную башню, где через контактные кольца противотоком движется нейтрализующий раствор (раствор только едкого натра или в комбинации с гипосульфитом натрия)

Учитывая серьезную опасность, которую представляет утечка хлора, необходимо снабдить помещения хранения эффективными приборами обнаружения утечек.

Утечка газообразного хлора из емкости хранения может продолжаться, только если происходит внешний нагрев стенок резервуара до температуры испарения жидкого хлора. С другой стороны, выход газа под давлением из отверстия утечки сопровождается понижением температуры, ведущим к уменьшению количества вытекающего газа.

Следует избегать поливки водой или погружения резервуара с хлором в воду; исключение составляют небольшие баллоны с хлором, когда отсутствует оборудование нейтрализации утечки хлора и когда единственное решение, в случае блокирования крана баллона, — это погружение последнего в нейтрализующий раствор.

При работе с опасными веществами и при их хранении, независимо от существующих правил, необходимо соблюдать элементарные меры предосторожности

Таблица 1
Область применения различных материалов, используемых для хранения
реагентов

Реактивы	Материалы и покрытия					
	Емкость бетонная без покрытия	Емкость стальная			Емкость пластмассовая	
		Без покрытия	С покрытием		ПВХ, укрепленный армированной стеклянной нитью ¹ , ПЭВП, полипропилен	Полиэстер, винилэстер
			Эпоксидная смола ¹ , гипалон, полизтиллен	Эбонит		
Серная кислота						
$H_2SO_4 < 20\%$			х	х	х	х
$92\% < H_2SO_4 < 98\%$		х				
Соляная кислота			х	х	х	
Каустическая сода NaOH от 47 до 50 %				х ²		
Каустическая сода NaOH < 47 % ³		х ²			х ²	
Силикат натрия	х	х			х	
Сульфат алюминия			х	х	х	х
Хлорное железо			х	х	х	х
Перманганат калия			х	х	х	х
Гипохлорит натрия			х	х	х	х
Бикарбонат натрия					х	х
Хлорит натрия					х	х
Полиэлектролиты	х				х	х

¹ Для ПВХ и эпоксидных смол температура ниже 30 °С
² 1 < 50 °С
³ Товарная каустическая сода после разбавления

(даже если их необходимость не оформлена законодательно) Можно привести следующие рекомендации

- использование защитной одежды, очков, перчаток и фартуков во время работы с агрессивными веществами,
- установка душей и специальных устройств для промывки глаз вблизи мест хранения кислот и щелочей и мест их переливания,
- устройство раздельных изолированных приемков под цистернами с кислотой и щелочью,
- понятная и четкая маркировка трубопроводов разных реагентов для предотвращения опасного смешения при их доставке (например, кислота/гипохлорит),
- систематическое обслуживание трубопроводов и устройств мокрой очистки газа, устанавливаемых на горловине резервуара с соляной кислотой, так как ее пары действуют раздражающе на слизистую оболочку дыхательных путей и вызывают коррозию расположенного рядом оборудования,
- опорожнение в нижних точках системы циркуляции опасных реагентов — для обеспечения безопасности действий по обслуживанию,
- следует учитывать, что процесс растворения кристаллического или безводного хлорного железа, негашеной извести, серной кислоты и едкого натра сопровождается **интенсивным выделением тепла** (см гл 8, п 3, рис 19, 21, 26),
- ПАУ при определенной концентрации в виде пыли в воздухе может самопроизвольно возгораться Работы с огнем запрещены в соответствующих помещениях, которые должны быть снабжены установками вентиляции и фильтрации воздуха

2. Дозирование жидких реагентов

2.1. Насосы-дозаторы

Насосы-дозаторы, обычно применяемые при обработке воды, — это объемные насосы, расход которых регулируется изменением длины хода поршня или частоты ходов (рабочих циклов). Такое регулирование может быть ручным или автоматическим (серводвигатель или двигатель с переменной скоростью) В последнем случае ввод реагентов может определяться одним параметром, например расходом воды, или двумя параметрами расходом воды и величиной рН Выпускаются насосы, различающиеся по мощности (от нескольких см³/ч до нескольких м³/ч), точность работы которых может достигать $1/1000$ полной производительности.

Дозирующие насосы могут быть поршневыми, диафрагменными, с механическим или гидравлическим приводом Они характеризуются расходом реагента, рабочим давлением, точностью дозирования, материал дозатора должен быть совместим с дозируемой жидкостью Несколько этих насосов можно механически связать между собой в многоканальную установку, и тогда они обеспечивают пропорциональную подачу различных жидкостей

3. Хранение и дозирование сыпучих реагентов

Основными сыпучими реагентами, используемыми при обработке воды, являются известь, сульфат алюминия и хлорное железо Особые случаи полиэлектролитов и ПАУ рассматриваются в п 6

3.1. Хранение

Для малых сооружений речь может идти о площадках хранения реагентов (в мешках или контейнерах). На средних и больших сооружениях используются бункеры.

Вместимость бункера может быть различной (от 15 до 200 м³, даже до 400 м³) в зависимости от мощности сооружения и требуемой автономности. Реагенты доставляются навалом грузовиками или вагонами. Бункеры — металлические, из армированного стекловолокном полиэстера или бетонные. Они имеют цилиндроконическую форму.



Фото 3. Бункер с известью

3.1.1. Особенности бункера

Бункер для хранения реагентов (фото 3) должен быть оборудован вентиляционным люком с пылеуловителем и редукционным клапаном безопасности от повышенного давления. Трубопровод загрузки диаметром 80 или 100 мм (1) должен иметь изгибы с радиусом кривизны, достаточным для минимизации износа и потери напора. По возможности длину этой трубы также следует ограничить. Бункер следует заземлить для предотвращения накопления статического электричества. Вместимость склада реагентов должна значительно превышать (минимум на 50 %) объем поставки.

Чтобы облегчить выгрузку, дно бункера выполняется в виде конуса с углом по меньшей мере 60°.

3.1.2. Загрузка бункера

Подача реагента в бункер производится с помощью компрессора, установленного на грузовике или стационарном пункте, по гибкому шлангу, подсоединенному к восходящему трубопроводу бункера с помощью устройства с защелкой. Давление перекачивания не должно превышать 160 кПа.

Возможно несколько способов контроля уровня реагента в бункере:

- измерением объема (не рекомендуется для засоряющих продуктов),



Фото 4. Нижняя часть бункера с устройством подачи «Sodimat»

- вибрирующей пластиной,
- возвратно-поступательным щупом с механическим приводом

Примечание Контролировать наполнение можно также путем взвешивания бункера.

3.1.3. Приспособления, предназначенные для облегчения выгрузки реагентов

Сыпучие продукты имеют тенденцию образовывать сводообразные или цилиндрические полости в бункере. Избежать этих явлений позволяют несколько решений.

- механическое устройство подачи с гибкими пластинами (см фото 4) ее вращение обеспечивает высыпание продукта (рис. 3),
- вибраторы (применяются с осторожностью, поскольку могут привести к уплотнению продукта),
- псевдооживление введение воздуха низкого давления (от 20 до 60 кПа) через распределители, установленные в конической части бункера. Этот способ дает хорошие результаты только при использовании с перерывами и совершенно сухим воздухом

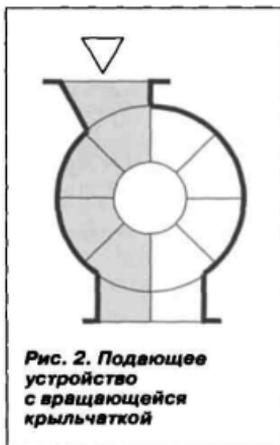
3.2. Дозирование реагентов

3.2.1. Объемные дозаторы

3.2.1.1. Подающее устройство с вращающейся крыльчаткой

Этот тип дозирования (рис. 2) используется на сооружениях, где нет необходимости в большой точности. Подающее устройство может управляться с помощью реле времени или двигателя с изменяющейся скоростью. Дозируемая подача может изменяться в диапазоне 50–1000 л/ч.

Это устройство в силу своей герметичности может обеспечивать равномерное питание системы пневмотранспорта.



3.2.1.2. Дозатор с поворотным диском

В основании загрузочной воронки расположен диск (фото 5), поворачивающийся с постоянной скоростью. От нее нож, направление которого регулируется, отсекает больший или меньший слой реагента.

Дозатор с поворотным диском имеет большую точность, чем дозатор с вращающейся крыльчаткой. Он подходит для подачи таких реагентов, как известь, карбонат кальция или натрия, в диапазоне расходов 10–1000 л/ч.

Изменением расхода реагента осуществляется изменением положения ножа, двигатель имеет постоянную скорость и функционирует непрерывно или периодически. Может также использоваться двигатель с изменяющейся скоростью.

3.2.1.3. Шнековый дозатор

Этот тип дозатора позволяет подавать с достаточной точностью большую часть сыпучих реагентов, включая реагенты, склонные к текучести. Он загружается из бункера, оснащенного подающим устройством (рис 3). Подающее устройство обеспечивает регулярное снабжение шнека продуктом постоянной плотности. Таким образом, наполненный шнек своим вращением увлекает требуемое количество продукта в дозирующую трубу. Шнек и дозирующая труба — гибкие или жесткие.

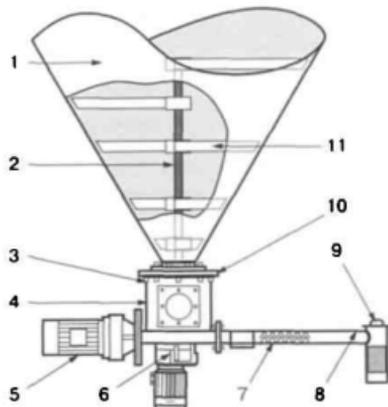
Хотя оптимальной является горизонтальная конфигурация, дозатор со шнеком позволяет, если необходимо, поднимать продукт на небольшую высоту.



Фото 5. Дозатор с поворотным диском, снабженный вихревой камерой. Вид с открытой крышкой

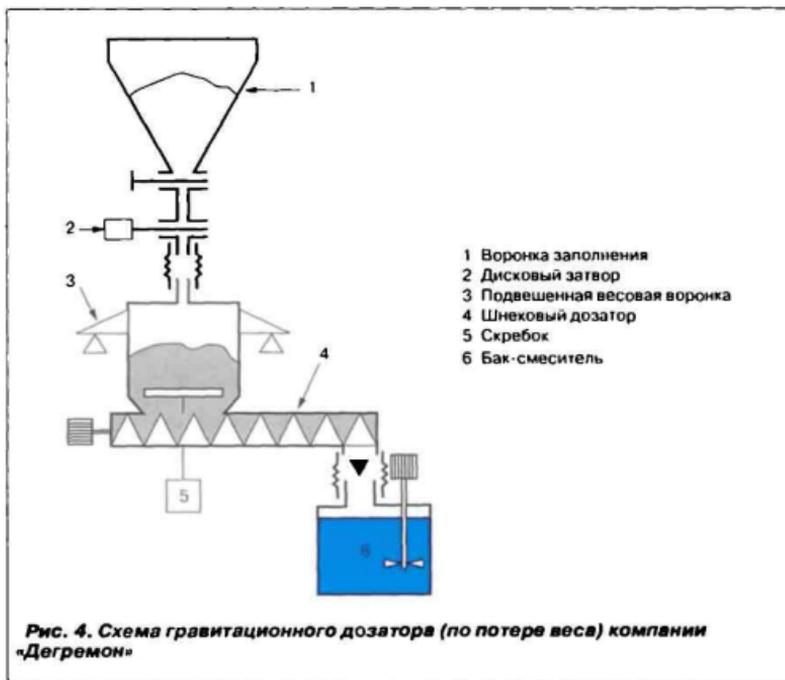
3.2.2. Гравитационное дозирование

На гравитационное дозирование не влияют явные изменения кажущейся плотности подаваемого реагента, так как он непрерывно взвешивается. Любое отклонение измеренного массового расхода от заданной величины приводит в действие устройство распределения, которое стремится погасить его.



- 1 Воронка бункера
- 2 Турбина подающего устройства
- 3 Свободный фланец
- 4 Корпус подающего устройства
- 5 Привод дозатора
- 6 Привод подающего устройства
- 7 Шнек
- 8 Труба дозатора
- 9 Гибкая лопатка
- 10 Задвижка
- 11 Разрыхляющее устройство

Рис. 3. Подающее устройство с пластинами и дозатор со шнеком «Sodimate»



На рис. 4 представлено устройство компании «Дегремон» для гравитационного дозирования (по потере веса)

Промежуточная дозирующая воронка, в которую поступает реагент, расположена на весах измеряющих действительный массовый дозированный расход реагента, а система регулирования изменяет скорость вращения шнекового дозатора для снятия отклонения от заданной величины массового расхода. Подача на весовую воронку осуществляется с воронки наполнения быстрым открытием задвижки черпака большой подачи до верхнего порога. В период наполнения система регулирования блокируется на последней скорости вращения шнека

4. Приготовление суспензий и растворов из порошковых и гранулированных реагентов

4.1. Общие принципы

Твердые реагенты, используемые при обработке воды, чаще всего переводятся в водный раствор или суспензию, что позволяет облегчить — транспортировку к месту использования.

- смешивание с подлежащей обработке жидкостью;
- регулярность и точность дозирования.

Приготовление растворов и суспензий обычных реагентов (хлорид натрия, сульфат алюминия, хлорное железо, гашеная известь) не представляет собой особых трудностей, когда эти реагенты имеют однородный гранулометрический состав и контролируемое содержание примесей. В противном случае принимаются специальные меры:

- для удаления примесей;
- для использования реагентов в кусковой форме или уплотненном состоянии.

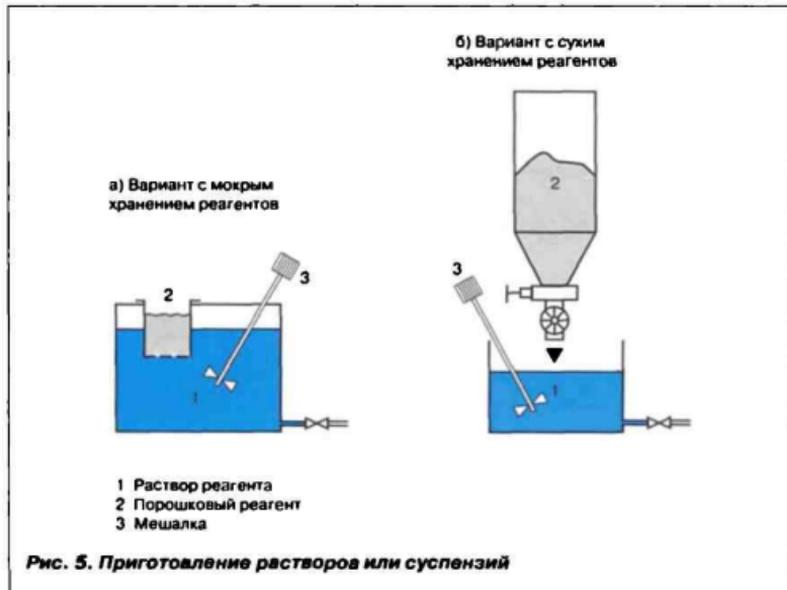
Установки для растворения и перевода в суспензию должны быть адаптированы к реальному качеству имеющихся в распоряжении твердых реагентов (гранулометрия и примеси).

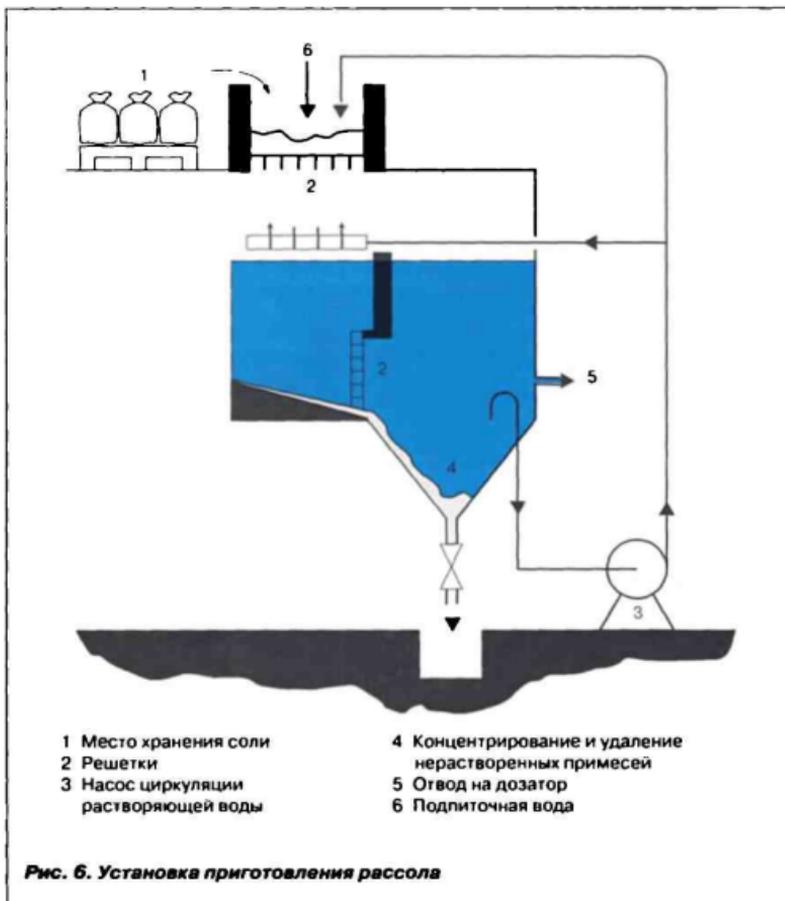
Поддержание во взвешенном состоянии реагентов, обладающих способностью формировать пробки или отложения на стенках, таких как известь или активированный уголь, предполагает соблюдение особых условий.

Для перевода в раствор или суспензию твердых реагентов чаще всего применяются

- механическое перемешивание (рис. 5),
- принудительная рециркуляция растворяющей воды (рис. 6)

Перемешивание суспензий должно поддерживаться постоянно, для растворов оно обычно применяется только во время растворения.





Для непрерывного приготовления и дозирования реагентов необходимо иметь отдельные баки, чтобы не нарушать процесс обработки воды

4.2. Приготовление растворов

Максимальная концентрация растворов соответствует пределу растворимости реагента (насыщению) при данной температуре (см гл 8, п 3). Для большинства растворимых реагентов имеется прямая зависимость между концентрацией раствора и плотностью, что упрощает контроль

4.2.1. Хлорид натрия

Он используется как реагент для регенерации ионообменных материалов (умягчение, денитризация питьевой воды). На рис. 6 показан пример установки приготовления рассола для крупной станции.

Дозирование осуществляется из отдельного бака, содержащего рассол определенной концентрации, обычно близкой к насыщению. Контроль осуществляется с помощью измерителя плотности (см. гл. 8, п. 3.2.1).

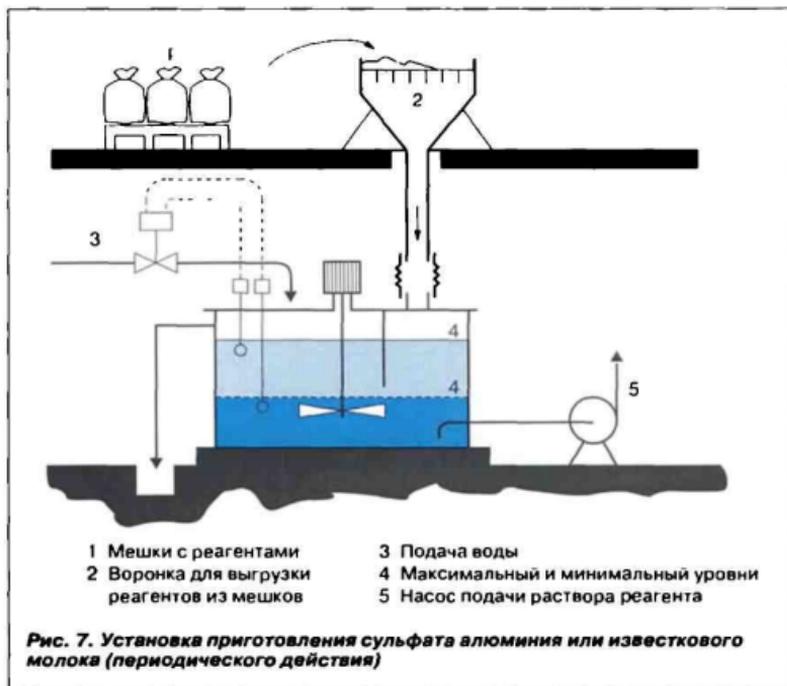
■ Материалы

Бетонные резервуары имеют защитное покрытие. Сталь (углеродистую или нержавеющую) нельзя использовать для всех частей, контактирующих с рассолом. Обычно применяются пластмассы и футерованная эбонитом сталь.

4.2.2. Сульфат алюминия

Он применяется в качестве коагулянта в твердой и чаще в жидкой форме. Кристаллический продукт $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ может быть в виде

— порошка с размером частиц 0,5 мм.



- гранул от 1 до 3 мм,
- гранул от 5 до 30 мм,
- кусков (иногда)

4.2.2.1. Растворение

Процесс растворения твердого реагента осуществляется обычно до концентраций от 100 до 200 г/л и контролируется по плотности раствора (см. гл. 8, п. 3.2.1)

4.2.2.2. Малые установки

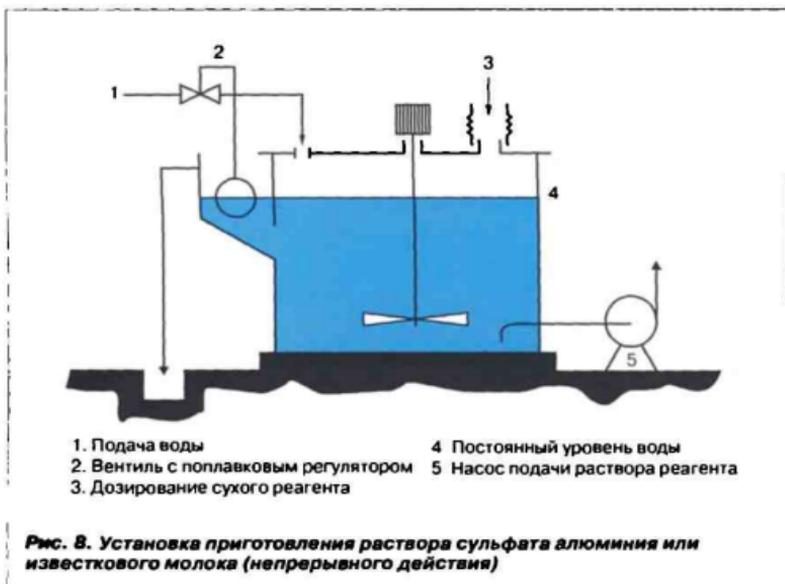
Растворение из мешков весом от 25 до 40 кг производится в баке-растворителе периодического действия с контролем уровней заполнения (см. рис. 7)

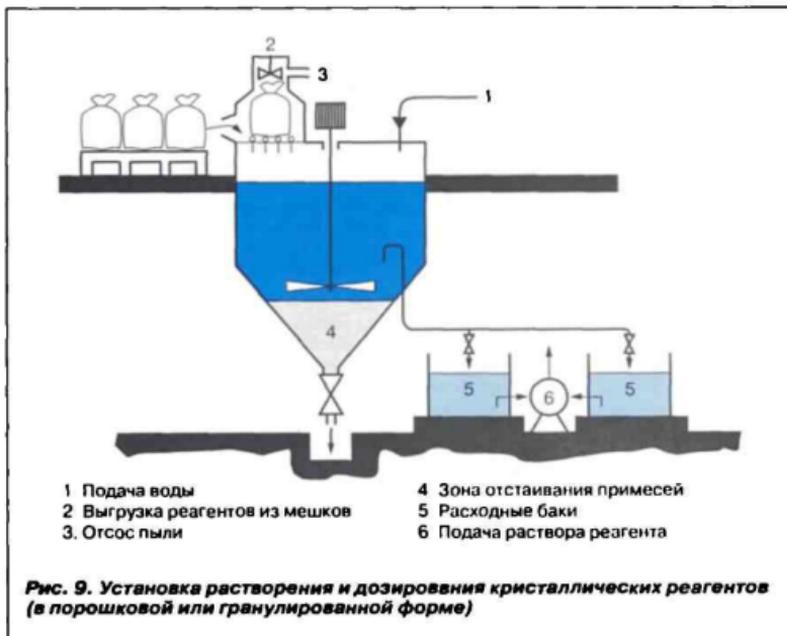
4.2.2.3. Крупные установки

Крупные установки обычно используются для растворения реагентов, поступающих из бункеров хранения в бак-растворитель непрерывного действия с постоянным уровнем заполнения (рис. 8)

В этом случае сухое дозирование обеспечивается объемными дозаторами (поворотный диск, шнек или вращающаяся крыльчатка) или, если требуется большая точность, гравиметрическими дозаторами. Оборудование, изображенное на рис. 7 и 8, применяется также и для гашеной извести.

В случае использования реагентов, содержащих много примесей, чаще всего предпочитают установку для растворения, представленную на рис. 9





4.2.2.4. Материалы и безопасность

Водные растворы сульфата алюминия являются кислыми, и емкости, используемые для их хранения или распределения, должны быть выполнены из коррозионно-стойких материалов (пластмасса и нержавеющая сталь 316 или 316 L)

Твердые реагенты выделяют пыль, раздражающую нос и горло

4.2.3. Хлорное железо

Используется в качестве коагулянта в твердой и главным образом жидкой форме. Кристаллический реагент ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) существует в форме коричневых или красных кусков, которые имеют тенденцию сплавляться друг с другом за счет воды, входящей в структуру кристаллов

4.2.3.1. Растворение

При растворении реагента необходимо обеспечить возможность слива остатков из бака для удаления нерастворимых примесей, которые часто присутствуют в товарном продукте (см. рис 9)

Дозирование осуществляется из расходного бака с раствором постоянной концентрации (например, 100–200 г/л по FeCl_3), которая контролируется по плотности (см. гл 8, п. 3.2.1).

Хлорное железо в конгломератах может быть растворено с помощью той же установки приготовления рассола, что представлена на рис 6

4.2.3.2. Материалы и безопасность

Водные растворы хлорного железа вступают в реакцию с углеродистой и нержавеющей сталью и почти со всеми металлами. Поэтому нужно особо подбирать материалы для резервуаров и систем циркуляции (пластмассовые и сталь, покрытая эбонитом) и защищать их.

Твердый реагент выделяет пыль, раздражающую нос и горло.

4.3. Известь

Известь является реагентом, наиболее часто встречающимся при обработке воды. Она поставляется в двух формах:

- негашеная известь CaO ,
- гашеная (или гидратированная) известь Ca(OH)_2 .

Внимание! В обоих случаях известь содержит от 4 до 20 % твердых примесей (CaCO_3 , SiO_2 и др.), которые должны удаляться перед ее использованием.

4.3.1. Негашеная известь

4.3.1.1. Гашение негашеной извести

Негашеная известь используется при обработке воды прежде всего в форме порошка. Ее преимущества перед гашеной известью:

- меньшая стоимость,
- большее содержание CaO , чем в гашеной извести, более высокая объемная плотность, что предполагает меньшие расходы по транспортировке и хранению (кажущаяся плотность негашеной извести — 0,7–1,2 кг/дм³, гашеной извести — 0,3–0,6 кг/дм³).

Однако у негашеной извести есть два недостатка:

- обеспечение хорошего гашения требует дополнительных вложений,
- качество негашеной извести зачастую более непостоянно, чем гашеной.

Гашение извести происходит по реакции



Эта реакция экзотермическая, и выделяющаяся при 25 °С теплота составляет 275 ккал на 1 кг CaO (см. гл. 8, п. 3.2.4.7).

Химическая активность известкового молока, связанная с высокой дисперсностью суспензии, является функцией температуры гашения. Последняя должна быть как можно более высокой, т.е. с минимальным поступлением воды при гашении извести.

■ Порошковая негашеная известь

Негашеная известь, используемая при обработке воды и осадков, должна отвечать следующим требованиям:

- содержание $\text{CaO} > 90\%$, $\text{MgO} < 1,5\%$, $\text{SiO}_2 < 1,5\%$,
- способность к реакции с водой — не более 25 мин для достижения 60 °С для смеси 150 г извести на 600 г воды при начальной температуре 20 °С,
- известь тонкого помола или просеянная (гранулометрия 0–90 мкм).

На практике используются два способа приготовления

- установка приготовления известкового теста — смешивают три или четыре части воды и одну часть извести, достигается максимальная температура и ко-

роткое время реакции. Подача воды является функцией вязкости массы (вращающего момента смесителя) и/или температуры.

— установка приготовления известкового молока требуемая концентрация в известковом молоке составляет 50–200 г/л, датчик температуры предназначен для обеспечения безопасности на подаче извести. Этот тип установки (рис. 10), хотя и имеет меньшую производительность, легче поддается автоматизации, проще и надежнее в эксплуатации.

Внимание! Не следует останавливать мешалки в баках 1 и 2, если в них еще находится известковое молоко, иначе существует риск осаждения извести и ее отвердевания.

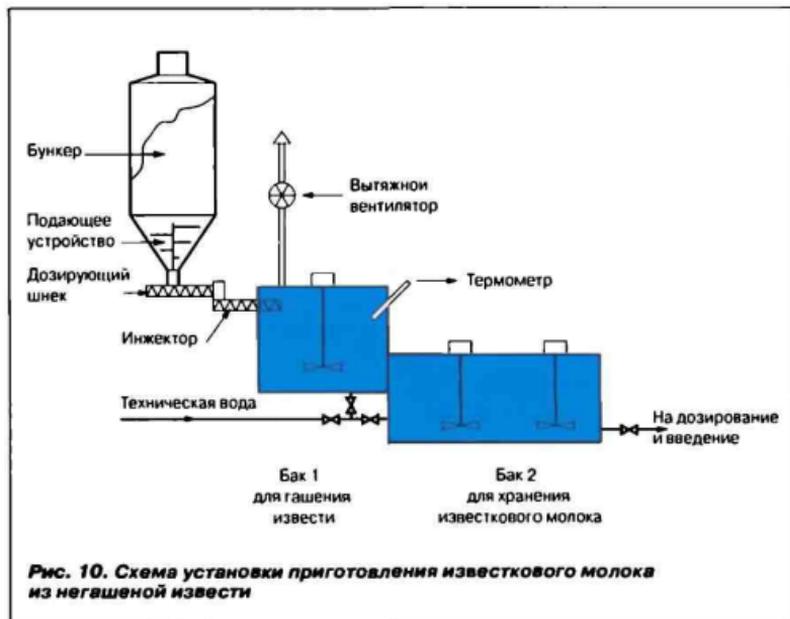
■ Негашенная известь в гранулах (0–20 мм)

Можно использовать установку для приготовления известкового теста, содержащую камеру гашения извести с фиксированным горизонтальным лотком и системой механического перемешивания, а также камеру разбавления и механического удаления недожженной извести.

■ Известняк кусковой (10–60 мм)

Можно использовать

— установку непрерывного действия большой мощности (1–10 т/ч), включающую



- горизонтальный цилиндрический барабан с медленным вращением, снабженный лопастной мешалкой и черпаками подъема извести для первичного разделения,
 - фильтр для механического удаления недожженной извести;
- установку порционного приготовления малой производительности (1–2 т/сут), простой аппарат для дробления кусков грузом или подвешенными скребущими лопастями

4.3.1.2. Приготовление известкового молока из негашеной извести

Гашеная известь применяется главным образом в виде известкового молока, которое представляет собой суспензию частиц гидроксида кальция в воде. Его концентрация обычно находится в пределах 50–100 г/л для удобства использования, поскольку:

- при концентрациях 100 г/л существует риск выпадения осадка и закупоривания;
- при концентрациях 50 г/л существует риск карбонизации

■ Хранение порошковой извести

Порошковая известь хранится в мешках на 25 кг или в бункерах согласно размерам сооружения. Во Франции обычно используют бункеры минимальной емкости 50 м³, соответствующей максимальной полезной емкости грузовика 25 т

В нижней части бункера имеется установка подачи. Механические устройства подачи предпочтительнее пневматических

■ Подача порошковой извести

Способы подачи по степени предпочтительности.

- гравитационный (наиболее распространенный),
- механический (в основном шнековый),
- пневматический (на короткие расстояния, например для разгрузки грузовика-цистерны)

■ Дозирование

▶ ИЗВЕШЬ В ПОРОШКЕ

Количество порошковой извести, поступающей в баки-растворители, измеряется либо объемным дозатором (шнек или вращающиеся крыльчатки), либо гравиметрическим дозатором (весовые воронки).

▶ ИЗВЕШТКОВОЕ МОЛОКО

Известковое молоко постоянной концентрации готовится в баках-растворителях, оборудованных механическими мешалками (см рис 7 и 8) с добавлением воды низкой бикарбонатной жесткости (не образующей накипь)

Дозирование осуществляется насосами

- объемными (дозаторами или с эксцентрическим ротором);
- центробежными, используемыми обычно для циркуляционного контура приготовления раствора известкового молока с автоматическими вентилями дозирования, которые работают по принципу «все или ничего» (рис 11). В этом случае дозирование часто обеспечивается открытием этих задвижек, например, по показаниям pH-метра



■ **Особые меры предосторожности при эксплуатации (опасность закипания)**

Известковое молоко содержит взвешенные частицы извести, которые способны оседать при остановке перемешивания или циркуляции образующийся в результате этого осадок может забивать части механизмов, на которых он осаждается, например вентили, задвижки, насосы-дозаторы. Таким образом, для создания и эксплуатации установок приготовления и подачи известкового молока требуется соблюдение особых предосторожностей. Например:

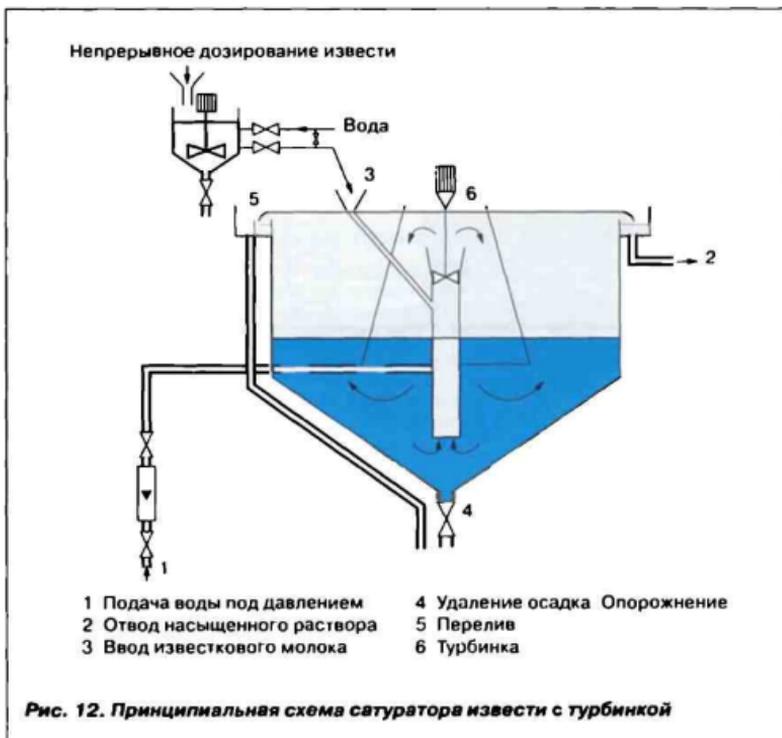
- трубопроводы должны быть сделаны из гибких материалов (каучук) или легко демонтироваться;
- диаметр труб должен обеспечивать наилучшее соотношение между достаточным поперечным сечением (закупоривание) и правильной скоростью циркуляции (отложения),
- после каждой остановки следует выполнять промывку труб чистой водой

4.3.2. Известковая вода

Известковая вода (насыщенный раствор извести) часто используется на станциях питьевой воды. Его полный щелочной титр, который зависит от температуры растворения, составляет 220 °F при 20 °C. Это соответствует концентрации $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 1,65 г/л (см. гл 8, п. 3.2.4.1, табл 28).

Известковая вода готовится из известкового молока в аппарате, называемом сатуратором, который обеспечивает.

- перевод извести в раствор;
- удаление примесей и осадка карбонатов



4.3.2.1. Статический сатуратор

Данный аппарат позволяет получить насыщенный известью раствор путем пропускания воды через слой извести в течение времени контакта, достаточного для насыщения этой воды

Известковое молокоготавливается в периодическом режиме. Известь вводится под действием силы тяжести или под напором во внутреннюю часть сатуратора, после того как предварительно в нем был понижен уровень жидкости и удален осадок. Этот цикл осуществляется обычно каждые 24 ч.

После времени отстаивания подлежащая насыщению вода медленно поступает в нижнюю часть аппарата, а насыщенная известковая вода забирается с поверхности.

Сатуратор может давать в виде насыщенной известковой воды от 1,3 до 1,6 кг $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в час на квадратный метр его поверхности.

4.3.2.2. Сатуратор с турбинкой

Этот аппарат (рис. 12) позволяет получать с той же площади большее количество известковой воды, чем статический сатуратор, а именно от 3,2 до 4 кг $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в час на квадратный метр его поверхности.

Известковое молоко может приготавливаться непрерывно или периодически, но подаваться должно непрерывно. Оно вводится самотеком или под напором в патрубок рециркуляции осадка или в трубопровод поступления воды для растворения.

Циркуляция раствора осуществляется с помощью турбинки (6), расположенной в верхней части трубы, в которую подается также подлежащая насыщению вода (1) и где осуществляется тщательное перемешивание воды и осадка карбонатов. В аппарате формируется слой осадка, уровень которого регулируется порогом камер концентрирования, куда переливается этот осадок.

Удаление последнего осуществляется обычно через трубопроводы камер концентрирования (5) и, в порядке исключения, опорожнением (4) (тяжелые осадки). Заметим, что для приготовления известковой воды можно использовать все установки компании «Дегремон» со взвешенным слоем осадка (например, **Pulsator**), и прежде всего отстойники с рециркуляцией осадков.

- сатуратор с турбиной (фото 6)
- **Circulator**,
- **Turbocirculator**,
- **Densadeg**, который представляет интерес при больших количествах известковой воды.

Можно заметить, что добавление хлорного железа в очень малых дозах еще больше увеличивает содержание CaO в известковой воде.

Сатураторы извести могут также применяться для предварительного растворения извести до стадии насыщения.

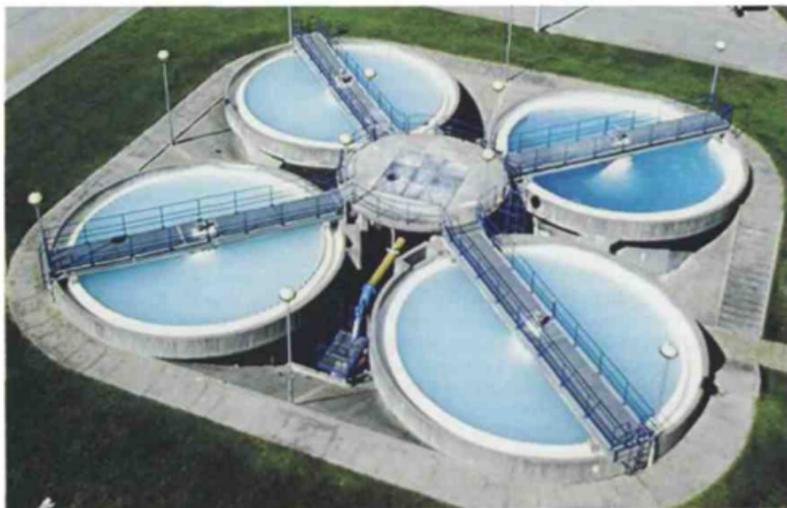


Фото 6. Станция «Asselceira» в Лиссабоне (Португалия). Четыре сатуратора извести. Производительность 1200 кг извести в час



На рис. 13 приведена общая схема цеха приготовления известкового молока и известковой воды, которая часто встречается на водопроводных станциях малых и средних размеров (известь в мешках с устройством выгрузки или в биг-багах)

4.4. Разные реагенты

4.4.1. Перманганат калия

Перманганат калия используется главным образом для окисления и удаления марганца

Реагент — фиолетовые чешуйки — растворяется в баке с перемешиванием. Он плохо растворим (5–30 г/л при 20 °С и времени контакта 15–60 мин). При концентрации, превышающей 15 г/л, существует риск выпадения осадка. Длительность хранения раствора ограничена. Дозирование осуществляется насосом.

Этот реагент разрушает металлы, содержащие двухвалентное железо. Используются защищенная сталь или пластмассы. С ним надо обращаться с предосторожностями (перчатки, очки).

4.4.2. Карбонат кальция

Порошок карбоната кальция используется при минерализации воды.

Он практически нерастворим (15 мг/л при 20 °С). Он переводится в суспензию и дозируется при концентрациях около 50 г/л с помощью тех же устройств, которые применяются для известкового молока.

4.4.3. Бентонит (глина)

Бентонит используется для утяжеления флокул, формирующихся при обработке исходной воды с небольшим содержанием ВВ или хлопьев активного ила
Перевод в суспензию и подача такие же, как и для карбоната кальция

4.4.4. Сульфат двухвалентного железа

Сульфат двухвалентного железа применяется для осаждения некоторых солей ($\text{CN} \cdot \text{S}^2$) и реже — для коагуляции. Кристаллический продукт ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) существует в виде зеленого порошка. Он растворим в воде (391 г/л при 20 °С — см гл. 8, п. 3). Его концентрация контролируется измерением плотности.

Перевод в раствор осуществляется в бетонных резервуарах, в которые непосредственно загружается кусковой продукт и подается вода. Отбор водного раствора осуществляется через сеть перфорированных трубопроводов, обычно расположенных в нижней части резервуара в слое фильтрующего песка. Приготовление насыщенного раствора затруднительно, поэтому готовят насыщенный раствор, который легко рекристаллизуется при понижении температуры. Избежать соответствующих неудобств (осаждение и затвердевание в резервуаре, закупоривание трубопроводов) позволяют различные решения, в том числе поддержание постоянной температуры.

Водные растворы сульфата двухвалентного железа имеют кислую реакцию, поэтому необходимо защищать материалы, находящиеся в контакте с раствором, или применять пластмассы.

5. Хранение, дозирование и растворение газообразных реагентов

5.1. Хлор

Хлор является наиболее универсальным окислителем и бактерицидным реагентом, но по соображениям безопасности необходимо строгое соблюдение особых условий его использования. Кроме использования в предварительной обработке воды он также применяется и на стадии конечного обеззараживания в следующих дозах:

- питьевая вода — порядка 1 мг/л,
- вода плавательных бассейнов — порядка 1–5 мг/л,
- сточные воды (при необходимости) после биологической очистки — порядка десятков мг/л,
- при периодической дезинфекции резервуаров и сетей распределения питьевой воды — в дозах порядка 10 мг/л при времени контакта 24 ч или 30 мг/л с промывкой струей стенок сооружений перед их заполнением. В последнем случае лучше использовать жавелевую воду.

■ Материалы

Сухой охлажденный хлор не действует на обычные металлы, но его агрессивность повышается с увеличением влажности и температуры. Поэтому трубопроводы и резервуары должны поддерживаться совершенно сухими и быть защищены от всякого нагревания.

5.1.1. Принципы подачи и дозирования

При хранении хлора необходимо руководствоваться действующим законодательством и общими указаниями п 1 (общие положения)

От емкостей хранения подача хлора к устройствам дозирования (хлораторам) может осуществляться

- в газообразной форме — для небольших расходов,
- в форме жидкости — для более значительных расходов

Из хлоратора хлор в газообразном состоянии под разрежением поступает в гидрозжектор, где он растворяется в рабочей воде

Хлорная вода вводится в точке применения

5.1.1.1. Подача

Чтобы поддержать поток газообразного хлора от емкости жидкого хлора, нужно обеспечивать подачу тепла (теплота испарения 56 ккал/кг при 20 °С). На практике цистерна с 1 т хлора может дать (без внешней подачи тепла) около 10 кг хлора в час при температуре 20 °С в помещении. Для больших расходов необходимо производить подогрев цистерн (термостатированная баня с температурой примерно 80 °С), при этом отбор хлора может осуществляться уже не в газообразной форме, а в жидкой

5.1.1.2. Дозирование

Газообразный хлор, вышедший из баллона, цистерны или испарителя, дозируется и приводится к рабочему давлению в аппарате, называемом хлоратором

Принцип работы вакуумных хлораторов основан на изменении расхода хлора пропорционально расходу рабочей воды, подаваемой в гидрозелеватор, с помощью которого осуществляется растворение газообразного хлора в рабочей воде

5.1.2. Вакуумный хлоратор

Вакуумные хлораторы были разработаны для достижения двойной цели: автоматическое прекращение подачи хлора, если нет воды для его растворения, и предотвращение выброса хлора в атмосферу, если произошла его утечка

Гидрозжектор, создающий вакуум, обеспечивает также и растворение хлора в воде

5.1.2.1. Компактный хлоратор

Компактный хлоратор, наиболее приспособленный к малым расходам хлора, может монтироваться прямо на головке баллона с хлором, иногда он связан с ним коротким трубопроводом

Трубопроводы должны быть как можно короче, что уменьшает риск утечки; но если хлоратор смонтирован прямо на баллоне, необходимо принимать меры предосторожности во время обслуживания, поскольку его следует снимать при каждой смене баллона

Принцип действия этого аппарата иллюстрируется на рис. 14. Рабочая вода под давлением, проходя гидрозжектор, вызывает разрежение в трубопроводе между расходомером и гидрозжектором. При разрежении открывается клапан безопасности хлоратора. Хлор проходит через хлоратор, градуированную трубку расходомера и потом через игольчатый регулятор расхода. В гидрозжекторе он мгновенно растворяется в воде, образуя хлорный раствор. При случайном разрыве или утечке

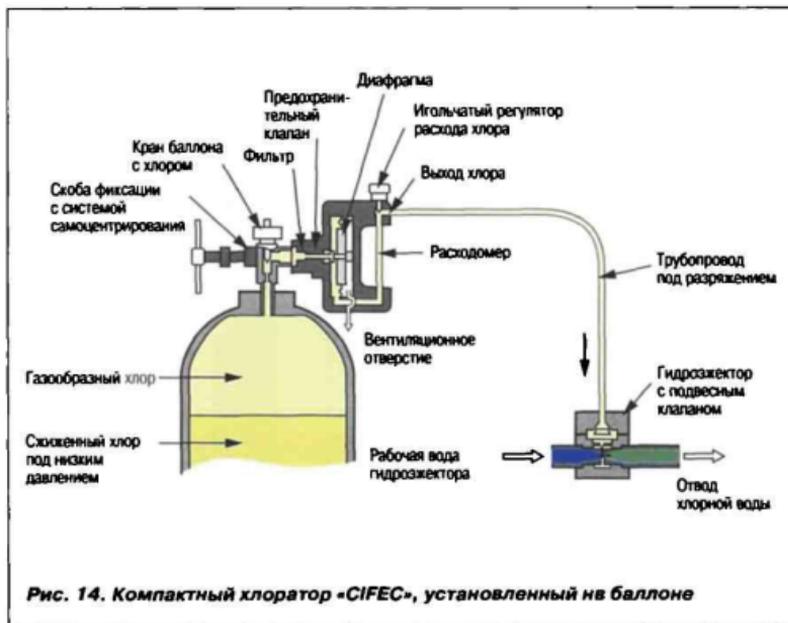


Рис. 14. Компактный хлоратор «CIFEC», установленный на баллоне

в трубопроводе, который связывает гидрозжектор с дозатором, разрежение исчезает на диафрагме и закрывается задвижка клапана безопасности на подаче хлора. Этот тип «компактного» хлоратора устанавливается прямо на баллон или цистерну с хлором и приспособлен для подачи от 5 до 4000 г/ч Cl_2 .

Наиболее распространенные модели хлораторов обладают следующими возможностями:

- автоматическое переключение с одного баллона хлора на другой, когда первый баллон опорожняется,
- подача сигнала «баллон пуст» или «отсутствие хлора».

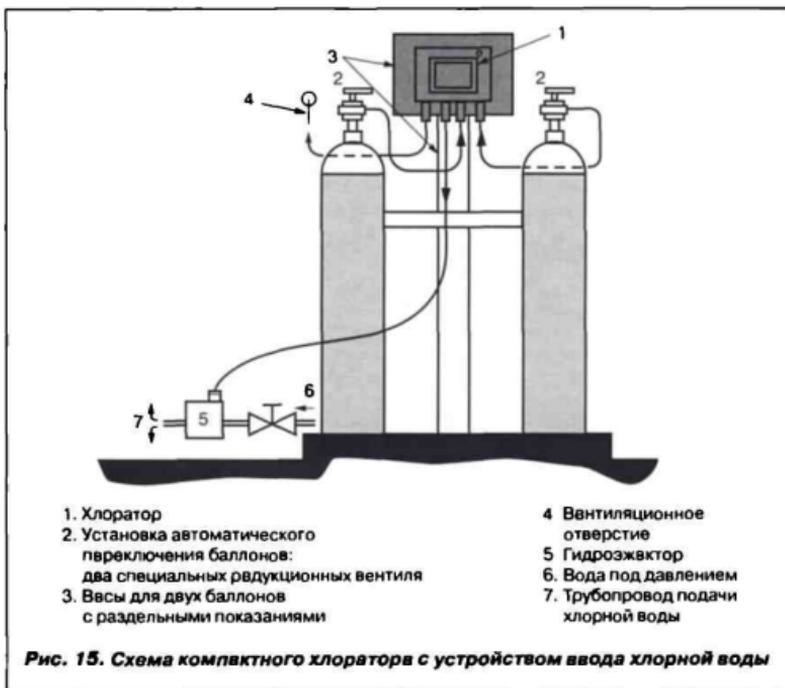
На рис. 15 дан пример компактного хлоратора, который устанавливается отдельно от баллонов с хлором.

5.1.2.2. Хлораторы с большим расходом

Хлораторы с большим расходом функционируют так же, как описанные выше с изменяющимся разрежением и питанием от цистерн с хлором. Их производительность может достигать 200 кг/ч (соответствует максимальной производительности испарителя). На рис. 16 показан цех хранения и дозирования хлора с применением таких хлораторов.

5.1.3. Определение и нейтрализация утечек хлора

Хлор — желто-зеленоватый газ с раздражающим запахом. Будучи в два с половиной раза тяжелее воздуха, он, в случае утечки, застаивается на уровне земли.



Для складов определенного размера французское законодательство предписывает установку в отдельном помещении (см. верхнюю часть рис. 16) детектора утечки хлора и устройства нейтрализации этой утечки.

Помещение узла нейтрализации включает:

- вентилятор (18) для забора содержащего хлор воздуха для нейтрализации;
- колонну нейтрализации с загрузкой контактными кольцами (17);
- емкость хранения (14) нейтрализующего раствора и насос (15), обеспечивающий опрыскивание им загрузки колонны нейтрализации, как только обнаруживается утечка;
- детектор утечки (19).

Детекторы утечки хлора и всасывающее устройство вентилятора (18) размещаются в нижней части помещения склада.

Обычно нейтрализующий раствор представляет собой смесь соды и гипосульфита натрия. Сода позволяет абсорбировать хлор и превращать его в гипохлорит, восстанавливаемый затем до Cl^- (анион хлора) гипосульфитом.

Сода обеспечивает также нейтрализацию кислотности, появляющейся при действии хлора на гипосульфит.

Чтобы нейтрализовать 1 кг хлора, нужно примерно 1,1 кг гипосульфита и 1,7 кг соды.

5.1.4. Схема комплектной установки

На рис. 16 показана установка, включающая помещения и оборудование для хранения и отбора жидкой фазы, испарения (5), дозирования в газообразной фазе (11) и (13) и для нейтрализации утечки хлора (14)–(19)

5.2. Углекислый газ CO_2

Углекислый газ используется для стабилизационной обработки (реминерализации) питьевой воды в сочетании с известью, а также для нейтрализации воды (см. гл. 3, п. 13.4.1). При нейтрализации возможно плавное регулирование величины pH благодаря точному дозированию и тому, что кривая нейтрализации воды является более пологой, чем у сильных кислот.

В случае реминерализации воды увеличение полного щелочного титра (ТАС) на 1 градус требует около 9 г CO_2 и 7,5 г $\text{Ca}(\text{OH})_2$ на 1 м³ воды.

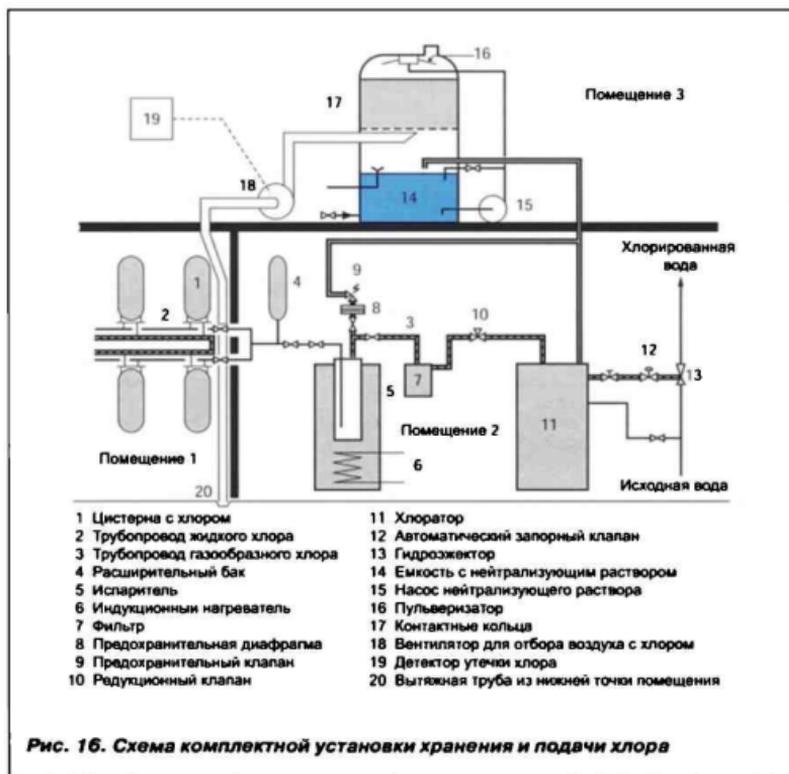


Рис. 16. Схема комплектной установки хранения и подачи хлора

5.2.1. Принцип действия установки введения CO_2

Хотя углекислый газ может производиться с использованием горелок, погруженных или нет в воду, обычно используется CO_2 , который хранится в жидком состоянии в резервуарах под давлением с теплоизоляционным покрытием и охлаждением (давление 20 бар, температура 20 °С). Жидкий CO_2 отбирается и испаряется в испарителе с подогревом, затем давление снижается до требуемого уровня (3 бара при 12 °С). Затем CO_2 вводится в обрабатываемую воду в газообразном состоянии с помощью пористого дискового диффузора, погруженного на несколько метров в воду в контактной колонне, или с помощью гидрозжектора (см принцип функционирования устройства для введения хлора)

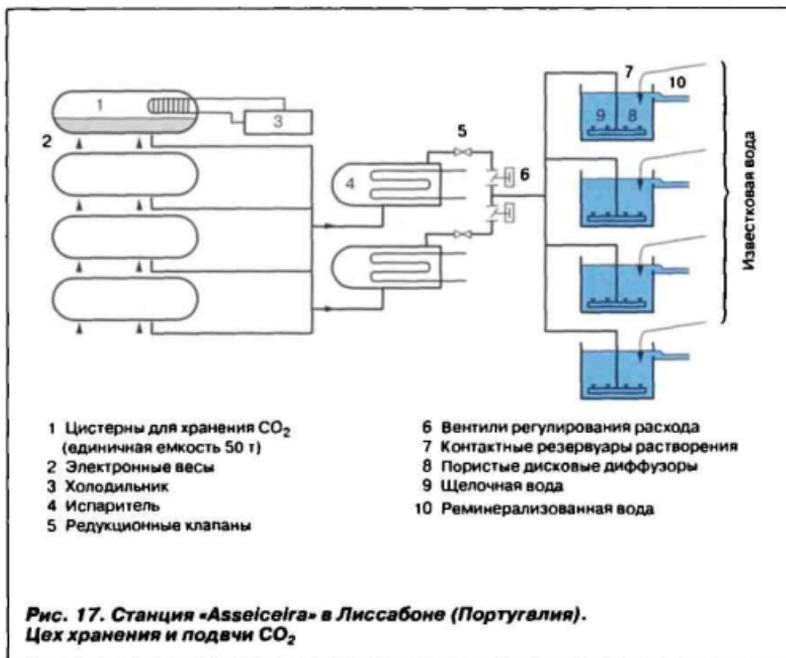
При небольших расходах можно использовать CO_2 , хранящийся в баллонах

5.2.2. Примеры реализации

На рис. 17 изображена схема станции «Asseiceira» реминерализации питьевой воды в Лиссабоне (Португалия)

Общая производительность установки регулируется в пределах 200–850 кг/ч CO_2

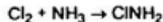
Расход CO_2 определяется расходом обрабатываемой воды, желаемой степенью обработки и, возможно, величиной pH реминерализованной воды. Он управляется



с помощью расположенных на газовом контуре регулирующих заслонок. Заслонки управляются регуляторами, которые в свою очередь получают сигналы от контролирующего процесс программируемого аппарата.

5.3. Аммиак NH_3

Аммиак все более часто применяют для обеззараживания питьевой воды хлором. Добавление аммиака превращает свободный хлор в хлорамин, что позволяет увеличить продолжительность бактерицидного действия реагента без образования тригалогенметанов.



Рекомендуемая доза — 5 г NH_3 на 1 г свободного Cl_2 (см гл 17)

Транспортировка и хранение концентрированных растворов (64 % NH_4OH) в теплое время года не предусмотрены из-за риска нагрева и, следовательно, появления избыточного давления. Нормальные условия хранения — в жидкой форме, в маркированных сосудах под давлением 6 бар (при 10 °C) и 12 бар (при 30 °C). Транспортировка должна осуществляться согласно рекомендациям безопасности, действующим в соответствующих странах.

При понижении давления аммиака до атмосферного температура его снижается до -31 °C (см гл 8, п 3 3 6, табл 40). Для поддержания температуры и давления газа используются теплообменники нагрева, расположенные на подающем трубопроводе и оборудованные устройством, предотвращающим замерзание подогреваемой воды.

Реакция растворения газа в воде экзотермическая (34–40 кДж/моль NH_3 в растворах с концентрацией менее 10 %).

6. Особые реагенты

6.1. Полимеры (полиэлектролиты)

Следует различать:

- полимеры типа полиаминов, использующиеся в качестве коагулянтов,
- полимеры типа сополимеров акриламида, использующиеся в качестве флокулянтов.

6.1.1. Приготовление полиаминов (органических коагулянтов)

Речь идет о катионных полимерах с малой молекулярной массой. Они производятся в форме растворов вязкости 50–10 000 сантипуаз. Данные реагенты могут быть поданы прямо из бочки или контейнера без предварительной подготовки. Это существенное преимущество, тем более что данные вещества очень стабильны.

Однако использование этих реагентов требует обязательного вторичного разбавления (в 100–200 раз) чистой водой с низким содержанием соли (если возможно, менее 200 мг/л), подаваемой в поток на выходе из насоса дозатора.

Всегда возможно и предварительное приготовление этих реагентов из маточного раствора, но при этом следует иметь в виду, что их стабильность в разбавленных растворах часто снижается и зависит от качества используемой воды (соленость менее 200 мг/л, и мутность менее 1 NTU). Рекомендуется использовать максималь-



но концентрированный маточный раствор (не менее 10 %), поскольку тогда можно ожидать стабильности раствора в течение около 48 ч

6.1.2. Приготовление сополимеров акриламида (органические флокулянты)

Полиакриламиды — полимеры очень высокой молекулярной массы, используемые в качестве флокулянтов. Обычно они находятся в виде порошка или эмульсии. Они могут быть анионными или катионными.

Некоторые из этих флокулянтов существуют в виде очень вязких растворов (5000–10 000 сантипуаз), которые могут подаваться насосами для последующего разбавления (в потоке на выходе из насоса дозатора)

6.1.2.1. Порошковые полиакриламиды

Растворение порошкообразного флокулянта имеет ряд особенностей

- растворы, даже разведенные, могут быть очень вязкими;
- флокулянты подвергаются механическому разрушению в случае слишком быстрого перемешивания;
- флокулянты имеют тенденцию образовывать сгустки, если их не перемешать тщательным образом.

Концентрация приготовления: 2–5 г/л (соответственно вязкости исходного продукта и возможностям насоса).

■ Ручное приготовление

Установка на площадке (рис. 18) включает:

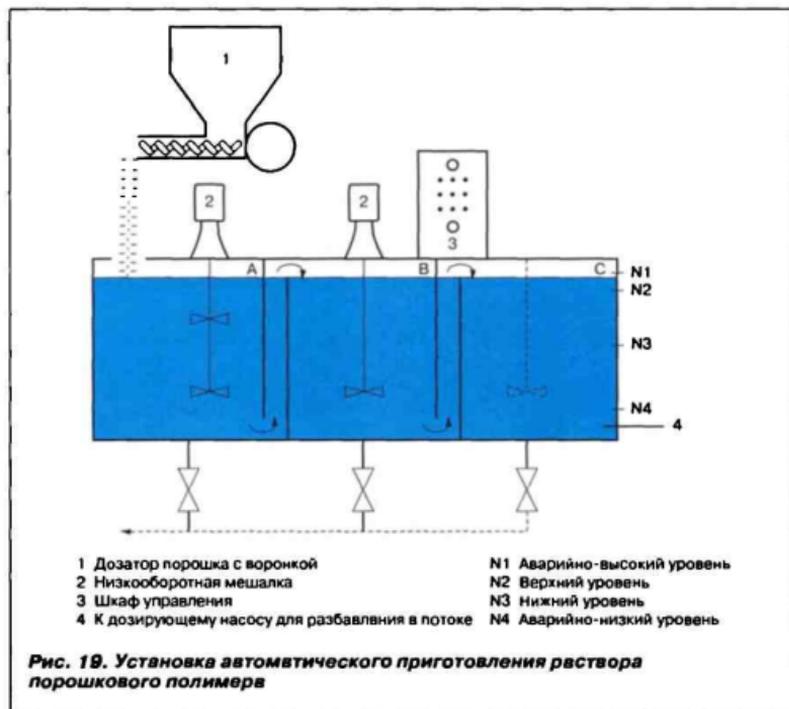
- два бака ручного приготовления: полимер разводится в воде в первом баке, затем следует фаза созревания во втором баке для завершения растворения продукта,
- шкаф управления;
- систему разведения;
- один или два насоса дозатора,
- датчики контроля уровня.

Время приготовления: от 30 до 60 мин в зависимости от времени, необходимого для созревания полимера.

■ Автоматическое приготовление

Установка (рис. 19) состоит из основной емкости, разделенной перегородками на три последовательных бака, сообщающихся через переливы:

- в первый бак А (бак приготовления) подается вода, давление и расход которой регулируется, а также порошок, подготовленный с помощью шнекового дозато-



ра, которым обеспечивается регулярное засыпание продукта в диспергирующее устройство, в баке полимер начинает набухать и растворяться, а затем перетекает в следующий бак.

— во втором баке В (бак созревания), иногда с устройством перемешивания, продукт находится в течение времени, необходимого для набухания молекулярных цепочек флокулянта и растворения продукта.

— третий бак С (бак подачи или хранения), снабженный системой регулирования для автоматизации процесса дозирования

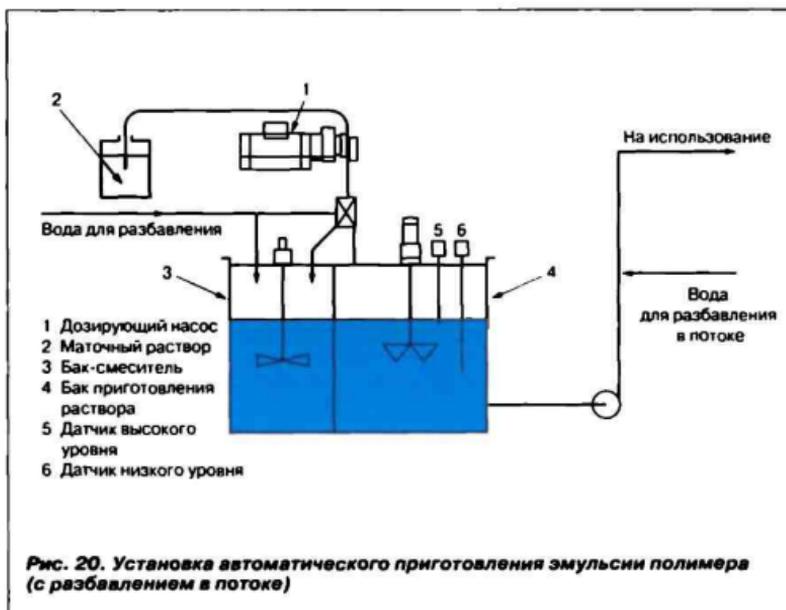
- аварийно-высокий уровень: подача сигнала тревоги (вопрос безопасности),
- высокий уровень: временная остановка подачи воды и порошка,
- низкий уровень: медленная подача воды и порошка,
- аварийно-низкий уровень: остановка насоса дозатора (вопрос безопасности)

6.1.2.2. Соплимер акриламида в эмульсии

■ Ручное приготовление

Приготовление эмульсий вручную осуществляется таким же образом, как и порошков, но при этом не нужен диспергатор

Концентрация маточного раствора лежит в пределах 2,5–10 г/л, и время приготовления ограничено 15–20 мин, что позволяет инверсировать эмульсию перед вторичным разбавлением в линию подачи



■ Автоматическое приготовление

Установка приготовления (рис. 20) включает

- дозирующий насос (1), который позволяет закачивать эмульсию из бочки или контейнера (2),
- узел смешивания эмульсии с подаваемой водой,
- датчик уровня (5–6) в баке приготовления (4) (нижний уровень, верхний уровень),
- шкаф управления для автоматизации работы установки

6.1.3. Разбавление в потоке

Для эффективного применения полимеров прежде всего необходимо обеспечить существенное разведение приготовленного раствора, чтобы получить равномерное распределение полимера в воде или в предварительно коагулированных осадках. Степень разведения зависит от вязкости полимера и осадков, а также от энергии смешивания в системе. Обычно раствор разбавляют

- до 0,5–1,0 г/л при обработке осадка,
- до 0,02–0,10 г/л при осветлении воды.

Это разведение в потоке реализуется в напорном трубопроводе дозирующего насоса

6.2. Диоксид хлора

Диоксид хлора — нестабильное соединение, которое готовится в растворе непосредственно на месте применения. Его получают обработкой хлором или соляной кислотой раствора хлорита натрия

6.2.1. Процесс обработки хлорита натрия хлором

Процесс окисления хлорита натрия хлором протекает по следующей реакции



Стехиометрически, чтобы получить 1 г ClO_2 , требуется 1,34 г хлорита натрия и 0,526 г хлора

Способ обработки хлорита натрия хлором применим на сооружениях, имеющих газообразный хлор для предварительного окисления и в конкретной точке технологической линии обработки воды. Величина pH хлорной воды должна быть в интервале 1,7–2,4. Концентрация хлора может меняться между 2,5 и 6 г/л Cl_2 .

В случае воды с высоким титром ТАС необходимо использовать хлорную воду с максимально возможной концентрацией хлора

Хлорная вода приводится в контакт с концентрированным раствором NaClO_2 (товарный раствор 30 г/л) в контактной колонне с кольцами Рашига в качестве загрузки. Время контакта в этой колонне не должно превышать 10 мин (оптимально 6 мин). Раствор диоксида хлора передается потоком рабочей воды с помощью гидрозжектора в бак хранения перед подачей его в сеть. В этом баке раствор ClO_2 разбавляется в концентрации 0,5–1 г/л и остается стабильным длительное время (24 ч). На практике, принимая в расчет избыток хлора в 10 % по отношению к стехиометрии и выход 95 %, для получения 1 г ClO_2 требуются 1,41 г чистого хлорита натрия и 0,61 г хлора

6.2.4. Предосторожности при использовании реагентов

■ Приготовление раствора хлорита натрия

Растворы хлорита натрия можно приготовить из хлорита натрия в порошке. Чтобы избежать выпадения карбоната кальция, необходимо использовать предварительно умягченную воду.

■ Хранение растворов

Концентрированные растворы NaClO_2 чувствительны к холоду. Для 25%-х растворов NaClO_2 кристаллизация начинается примерно с 10°C .

Растворы хлорита натрия и соляной кислоты должны храниться в отапливаемых помещениях при 15°C .

■ Особенности работы

Ввиду своих окислительных свойств хлорит не должен контактировать с веществами-восстановителями.

- серой и ее производными или веществами, их содержащими,
- органическими материалами,
- металлами в порошке и др.

6.3. Порошковый активированный уголь

В зависимости от мощности сооружения ПАУ может храниться в мешках, в бункерах или в биг-багах, и в табл. 2 и на рис. 22–24 показаны различные возможные варианты получения суспензии, часто называемой «шликер», содержащей 30–50 г/л ПАУ.



Рис. 22. Схема приготовления суспензии ПАУ в воде

Таблица 2
Различные типы установок

Складиро- вание	Дозирование	Получение суспензии	Транспортировка ввод
Бункер	От бункера 1	Бак постоянного уровня	Насосы передачи
	Воронка промежуточная		
Биг-баги	От стивада разгрузки 2	Гидроциклоны	Гидроэжектор
Мешки	Воронка Опорожнения мешков	Бетонный бак (переменного уровня)	Насосы дозаторы

¹ Возможные типы дозаторов
 - весовое дозирование
 - объемное дозирование со шнеком
 - объемное конвейерное дозирование

² Возможные типы дозаторов
 - весовое дозирование,
 - объемное дозирование со шнеком

³ Дозаторы с передающим шнеком

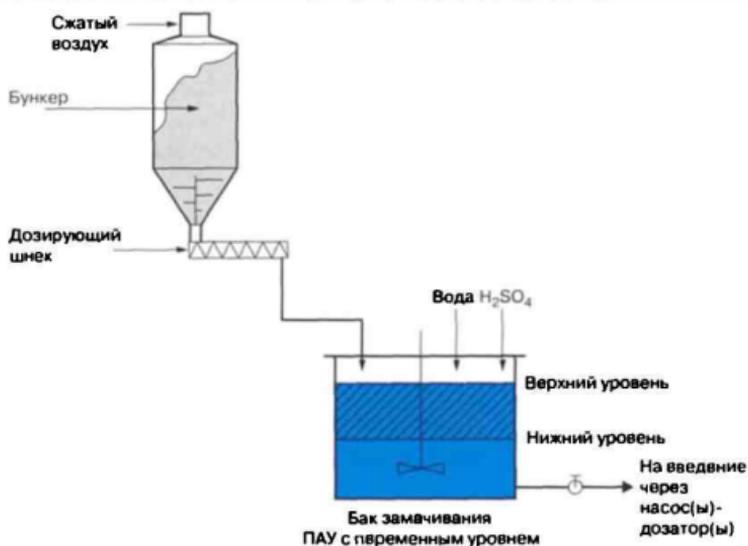
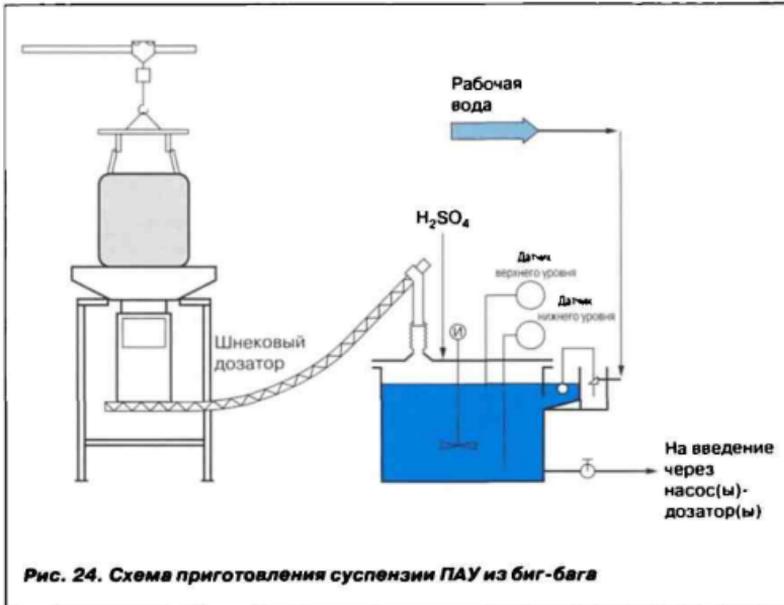


Рис. 23. Схема приготовления суспензии ПАУ из бункера хранения



На больших станциях (см рис 23) ПАУ из бункера подается дозирующим шнеком непосредственно в бак смачивания-подкисления. Чтобы получить требуемую концентрацию суспензии, необходимо использовать точный объем воды и соответствующую дозу угля (объемным или лучше весовым способом).

Когда бункер имеет большую высоту и существует тенденция уплотнения ПАУ, разумно применять промежуточную воронку, разрыхляющую ПАУ и обеспечивающую хорошую точность объемного дозирования.

Установка «промежуточной воронки» позволяет разрыхлять активированный уголь. Она питается передающим шнеком или вращающейся крыльчаткой. Система дозирования установлена на «промежуточной воронке». В случае предварительного разрыхления ПАУ возможно объемное его дозирование (дозировущий шнек).

ПАУ — продукт, плотность которого сильно меняется в зависимости от его псевдооживления или уплотнения (от 200 до 600 кг/м³). Это изменение плотности влечет за собой риски либо появления текучести, либо образования пустот, что нужно уметь предотвращать.

Кроме того, ПАУ — щелочной продукт. Он содержит оксиды, такие как CaO, который при контакте с водой образует Ca(OH)₂, вызывающий явление карбонизации в трубопроводах введения суспензии. Поэтому следует подкислять смачивающую воду, если ее титр ТАС > 5 °F.



Глава

21

-
1. ПРИБОРЫ И ИЗМЕРЕНИЯ 1389
 2. ОПЕРАТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ
В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ 1396
 3. УПРАВЛЕНИЕ СООРУЖЕНИЕМ
В ОТЛОЖЕННОМ ВРЕМЕНИ 1412
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 1416

Приборы, контроль и управление

1. Приборы и измерения

1.1. Общие положения

Для постоянного автоматического наблюдения за процессом обработки воды требуются аналоговые измерения и определение параметров, представляющее собой информацию типа «все или ничего». Важно четко различать эти два вида информации

- аналоговое измерение выдает сигнал, пропорциональный переменной величине,
- определение параметров выдает двоичные сигналы 0/1, т.е. указывает, достигла или не достигла переменная величина заданного значения

Наиболее часто применяемые аналоговые измерения и определение параметров выполняются в жидких средах с любой степенью загрязнения (включая жидкие осадки), в жидких реагентах, в пастообразных и сухих продуктах (обезвоженных и сухих осадках, порошках, золе и т.п.), в газах (технологический воздух, загрязненный воздух, биогаз, конденсат и т.п.) в рамках управления сооружениями и обеспечения их безопасности, а также обеспечения качества произведенной ими воды

В первой части главы изложены основные принципы измерений, используемых в области обработки воды, а далее приведены примеры выполнения измерений в различных областях обработки вод (см. пп. 1.5.1–1.5.3)

1.2. Принципы измерения обычных параметров

1.2.1. Измерение расхода

Из основных параметров наибольшее внимание следует уделять измерению расхода, поскольку на этом основано любое автоматическое регулирование и контроль

Существующие приборы для измерения расхода основаны на разных принципах в зависимости от назначения (для чистой воды или сточных вод) и от условий протекания воды (в открытом канале или в трубопроводе)

При измерении расхода обязательно должны соблюдаться несколько правил

- каков бы ни был используемый принцип измерения, следует точно соблюдать условия размещения приборов, соответствующие данной технологии,
- если требуется измерение расхода на входе и на выходе станции, в каждой точке следует использовать один и тот же принцип измерения во избежание допущения ошибки измерений при сравнении результатов

Различают несколько способов измерения расхода в открытом канале, в трубопроводе, а также особые способы измерения для газов

■ Измерение расхода в открытом канале

Как правило, поток воды пропускают через препятствие, создающее перепад уровней (расходомер Вентури, сливной желоб, измерительный порог, лоток Паршалла), и измеряют разницу между уровнями выше и ниже препятствия (ультразвуком, пьезометрическим датчиком или системой с пузырьком уровня)

Расходомер Вентури чаще всего используется при значительных объемах потока, а лоток Паршалла (рис. 1) — при расходах свыше $5000 \text{ м}^3/\text{ч}$, чтобы минимизировать потерю давления в пьезометрической линии

Измерение расхода (нестандартизированное) в открытом канале без ограничений можно проводить на основе данных о средней скорости течения (измеренной радаром или ультразвуком) и высоте уровня воды в канале (измеренной ультразвуком), но в этом случае получается менее точный результат

■ Измерение расхода в трубопроводе

В зависимости от качества и состояния жидкости, а также от диапазона измерений используют

- электромагнитные расходомеры с манжетой или, иногда, с встроенным датчиком, они применяются все шире, в том числе и для жидких и густых осадков,
- ультразвуковые расходомеры, измеряющие скорость прохождения,
- расходомеры с вакуумным устройством (пластина с отверстием, трубка Пито, расходомер Вентури, V-образный конус), применяются только для жидкостей без механических примесей,
- роторный расходомер с вращающимися лопастями,
- расходомер с использованием эффекта Допплера,
- расходомер с мишенью,
- расходомер с поплавком, так называемый чисто металлический (например, для горячих масел)

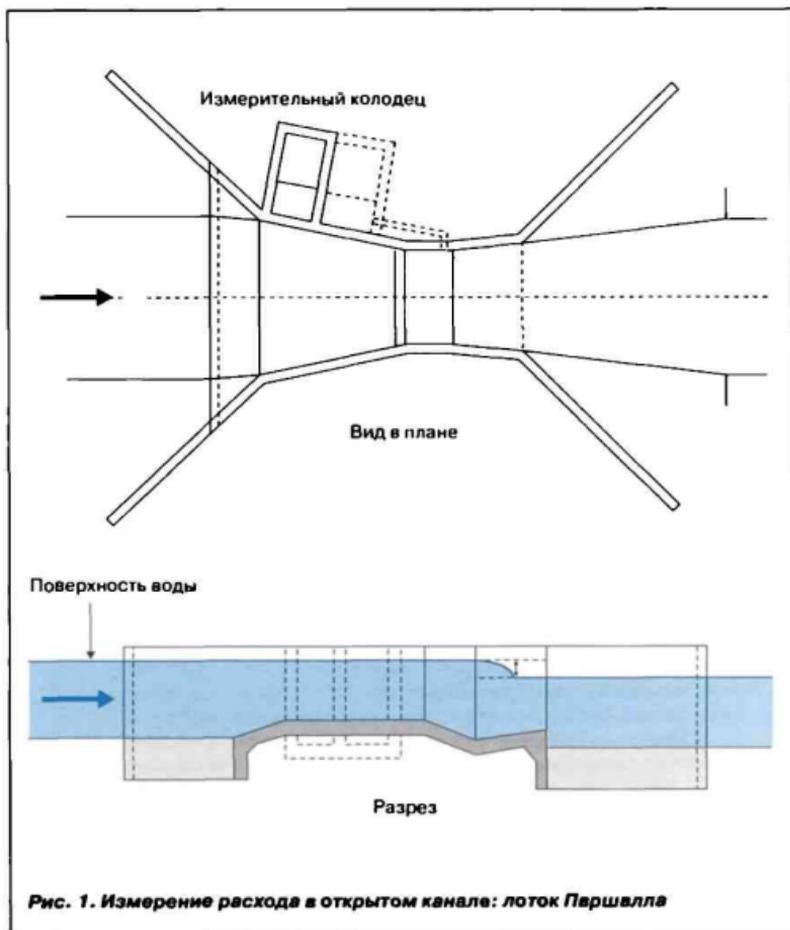
■ Измерение расхода газов

Все шире используются термический метод измерения массового термического расхода (воздух, биогаз) и метод с применением расходомеров с вихревым эффектом (пар).

1.2.2. Измерение уровня

Для выполнения измерений уровня жидкостей, твердых или пылевидных материалов используются ультразвук, радар, дистанционный радар (хранение золы или активированного угля в бункере), емкостный зонд, датчик давления (гидростатический уровень), а также взвешивание

При засорении процеживающих решеток обычно определяют разницы уровней с помощью ультразвука или пьезометрически.



1.2.3. Измерение давления

Для измерения давления в жидкостях с механическими примесями пригоден метод с использованием поверхностной мембраны, не требующий сепарации

1.2.4. Измерение дифференциального давления

Проведение измерений дифференциального давления требует точного определения условий размещения и эксплуатации приборов

1.2.5. Измерение температуры

Для измерения температуры используют термоэлектрический эффект, реализуемый в резисторных датчиках РТ 100 (сопротивление платины при 100 °С) в диапазоне от -50 до +300-400 °С. За пределами этих температур применяется измерение термопарой (биметаллический элемент)

1.2.6. Измерение механического усилия, вращающего момента

Эти измерения используются для некоторых видов вращающегося электромеханического оборудования в целях его защиты от чрезмерных нагрузок.

1.3. Специальные измерения при обработке воды

Эти измерения выполняются либо датчиками, либо анализаторами «на линии». В зависимости от области применения (включая газы) и от концентраций методы и принципы измерений могут быть самыми различными (амперометрия, фотометрия, флуоресценция, спектрофотометрия, титриметрия и др.)

1.3.1. Физические датчики

- Измерение мутности
- Подсчет количества частиц
- Измерение содержания взвешенных веществ (ВВ) оптическим методом.
- Измерение верхнего уровня осадков (ультразвук, оптически или радаром)
- Измерение удельной электропроводности – сопротивления.
- рН-метр
- Измерение редокс-потенциала
- Измерение содержания растворенного кислорода
- Измерение содержания хлора, свободного и в высоких концентрациях
- Измерение содержания озона

1.3.2. Специальные анализаторы качества воды

Как правило, для таких измерений отобранная проба должна быть доставлена на анализатор (см гл 5, п 2) для измерения:

- содержания нитратов,
- содержания аммиака,

- содержания органических веществ (ультрафиолетовое поглощение);
- прозрачности,
- содержания ортофосфатов,
- ХПК,
- содержания следов углеводов;
- содержания растворенных железа и марганца,
- содержания сульфидов,
- жесткости;
- биологической токсичности,
- индекса забивания

1.3.3. Анализаторы газов

- CO
- O₂
- CH₄,
- H₂S,
- NH₃,
- Меркаптаны
- Качественные параметры дыма (SO₂, HCl, CO, O₂, NO_x, пыль и т. д.).

1.4. Датчики типа «все или ничего»

Датчики типа «все или ничего» используются в целях обеспечения безопасности, для непосредственного управления оборудованием или предупреждения оператора. Они также применяются для управления обработкой.

Для обеспечения безопасности используются в основном следующие датчики типа «все или ничего»

- прессостаты,
- термостаты,
- концевые датчики движения (определение положения), механические или индуктивные,
- детекторы присутствия материала, оптические,
- датчики скорости вращения, индуктивные,
- датчики механического усилия или электрического напряжения (пороговые детекторы величины),
- детекторы уровня с поплавком, вращающимися лопастями, вибрационные, ультразвуковые, радиочастотные, оптические или по электропроводности,
- детекторы концентрации газов с электрохимической или каталитической ячейкой, полупроводниковые.

Для управления обработкой используются в основном следующие датчики типа «все или ничего».

- детекторы циркуляции жидкости, термические или с колеблющимися лопастями;
- детекторы присутствия пены, термические или по электропроводности;
- детекторы концентрации осадков, оптические или ультразвуковые

Некоторые расходомеры, являющиеся генераторами импульсов, могут подсчитывать объем протекания.

1.5. Примеры использования приборов и измерений в процессах

1.5.1. Примеры использования приборов и измерений на сооружениях обработки сточных вод

Таблица 1

Приборы и измерения	Область применения	Цель измерения
Автоматический пробоотборник	Исходная и очищенная вода (см гл 5, п 2 1)	Контроль качества на входе и выходе сооружения
Электромагнитный расходомер	Вода с примесями, очищенная вода, осадки	Учет, регулирование и автоматическое управление по расходу
Растворенный кислород, редокс-потенциал	В бассейнах с активным илом Окислительно-восстановительные реакции Исходная вода	Контроль и/или управление Контроль качества на входе
Электропроводность	Исходная вода	Контроль качества на входе
Гидростатический уровень	Жидкость с волокнами или другими примесями	Контроль уровня
Термический измеритель массового потока	Технологический и загрязненный воздух Биогаз	Контроль и/или управление Учет переработанных объемов
Верхний уровень осадка	В отстойнике Densadeg , во вторичных осветлителях, в сгустителях	Управление процессом удаления осадков
Содержание ВВ	В бассейнах с активным илом При рециркуляции ила	Контроль и/или управление
Мутность	На всех этапах обработки	Контроль качества
Расход потока в открытом канале	В выходном канале	Контроль обработанного потока
pH	На всех этапах обработки	Для регулировки
Содержание хлора в высоких концентрациях	Дезодорация (башня Жавеля (Javel))	Контроль хлорированного раствора
Содержание органических веществ (ультрафиолетовое поглощение)	На входе на станцию после процеживания	Контроль содержания загрязнений на входе
Содержание NH_4 , Содержание NH_3	При биологической обработке Газы в процессе дезодорации	Контроль и/или управление процессом
Содержание ортофосфатов	После дефосфатации	Контроль качества дефосфатации
Определение биологической токсичности	На входе на сооружения после процеживания	Контроль качества на случай аварийного загрязнения
Содержание H_2S	На входе на сооружения	Контроль качества на входе

1.5.2. Примеры использования измерений на станции очистки питьевой воды

Таблица 2

<i>Приборы и измерения</i>	<i>Область применения</i>	<i>Цель измерения</i>
Автоматический пробоотборник	Исходная и очищенная вода (см. гл. 5, п. 2 1)	Контроль качества на входе и выходе станции
Уровень, измеряемый дистанционно управляемым радаром	Хранение активированного угля, негашеной извести	Контроль уровня в бункере
pH	На всех этапах обработки	Регулирование pH
Содержание озона	Обеззараживание озоном	Регулирование введения озона
Содержание хлора	Обеззараживание хлором	Регулирование введения хлора
Мутность	На всех этапах обработки	Контроль качества на входе и на выходе станции в целях регулирования
Содержание частиц	После фильтрации или ультрафильтрации	Контроль качества на выходе со станции Контроль полноты обработки
Содержание органических веществ (УФ-поглощение)	Обработка ультрафильтрацией на входе/выходе	Контроль качества на входе и на выходе со станции
Содержание нитратов	Денитрификация	Контроль процесса
Содержание следов углеводородов	Перед обработкой на мембранах	Контроль наличия углеводородов Сохранность мембран
Индекс забивания (см гл 5, п. 4.2)	Перед проведением фильтрации через мембраны	Оценка засоряющей способности воды
Измерение жесткости	При декарбонатации	Контроль качества воды

1.5.3. Примеры использования приборов и измерений при обработке осадков

Таблица 3

<i>Приборы и измерения</i>	<i>Область применения</i>	<i>Цель измерения</i>
Измерение взвешиванием	Бункер обезвоженных осадков Резервная емкость с водой	Надежное измерение уровня
Электромагнитный расходомер (специальный)	Обезвоженные осадки	Учет и регулирование по расходу
Содержание ВВ	Жидкие и сгущенные осадки, концентраты	Контроль и управление
Содержание кислорода в газах	При сжигании, в дымах при термической сушке	Контроль сгорания и степени инертности продуктов в целях регулирования
Содержание CO	При получении сухих продуктов (способ Centridry , сушка) Хранение готовых продуктов	Обеспечение безопасности
Содержание H ₂ S	Внутри помещений	Обеспечение безопасности персонала
Содержание CH ₄	Внутри хранилищ и бункеров	Обеспечение безопасности
Температура	Любая термическая обработка Сбраживание	Контроль и управление

2. Оперативное управление в реальном времени

2.1. Развитие требований к системам контроля и управления

Индустрия обработки воды подвержена влиянию двух мощных факторов — все большее ужесточение норм, влекущее за собой усложнение процессов обработки,

— необходимость управления стоимостью воды (инвестиционные затраты и эксплуатационные расходы) со стороны клиентов местных властей, предприятий, частных лиц и т. д.

Для хорошего понимания изложенного далее необходимо обратить внимание на представленный ниже краткий словарь

Резервный автомат. Используются два типа резервных автоматов; в том и другом имеются два процессора и дублирующее программное обеспечение. Резервирование бывает так называемым теплым (*Warm stand-by*) или горячим (*Hot stand-by*). Так, система с горячим резервом основана на принципе «главный-подчиненный» с немедленным замещением. Одна и та же программа загружается на два процессора и работает, получая информацию от общего входа, причем процессоры полностью синхронизируются. Все блоки данных направляются на оба процессора, но лишь одна из двух систем управляет процессом и дает выходные команды. При возникновении неисправности резервное устройство, имея всю оперативную информацию, сразу берет управление на себя. Благодаря этому срок безотказной работы при совместном применении вычислительного устройства, блока питания и сетевой карты составляет свыше 10 лет.

Система контроля и управления, фр. SCC — *systeme de contrôle-commande* Управляющий интерфейс «человек-машина», фр. IHM — *interface homme-machine*, англ. HMI — *human-machine interface*

Значки, используемые далее в структурных схемах контрольно-управляющих систем, показаны на рис. 2.



Далее приведены восемь примеров структур станций, рекомендованные компанией «Дегремон» для обработки питьевой воды, очистки сточных вод и для обработки осадков.

Из этого следует, что для сооружений, уже работающих на пределе своих возможностей, остается лишь небольшой запас надежности — разница между подлежащей исполнению нормой и способностью заложенной технологии ее обеспечить. Таким образом, эксплуатация должна осуществляться на высоком уровне. Для этого требуется **быстрое обнаружение** любых отклонений и сбоев, чтобы **вовремя исправить или изменить** либо заданные параметры, либо режим работы оборудования и т. д.

Более того, эксплуатирующая компания должна оптимально использовать свои ресурсы, а персонал должен быть многофункциональным, уметь управлять своим участком, выполнять простые работы по техническому обслуживанию и при этом необязательно находиться в помещении управления. В любое время работы персонал должен иметь доступ к сообщениям, сигналам тревоги и информации, отображающей состояние станции или участка.

2.1.1. Станция питьевой воды

До недавнего времени работа большинства станций была основана:

- на использовании систем отстаивания-фильтрации (через песок или активированный уголь), которые требовали лишь редкого (примерно раз в неделю) изменения параметров процесса, по крайней мере в зонах со стабильными условиями,
- на поочередном переключении фильтров, особенно в циклах по 24 ч и более (время промывки около 30 мин).

Сегодня станции перешли на применение систем, использующих осветление на мембранах, с периодичностью обратных промывок от 20 до 60 мин (время промывки около 1 мин), при этом

- несколько раз за цикл требуется устанавливать давление и расход (иначе поток снижается из-за забивания фильтров),
- устанавливается большое число блоков [например, на Юго-Западной водопроводной станции (ЮЗВС) в Москве — более 50, см. рис. 4], которые регулярно выводятся из работы для осуществления полной обратной промывки или даже химической чистки.

Этот переход отражают два примера решения структуры, приведенные ниже.

■ Классическая структура станции

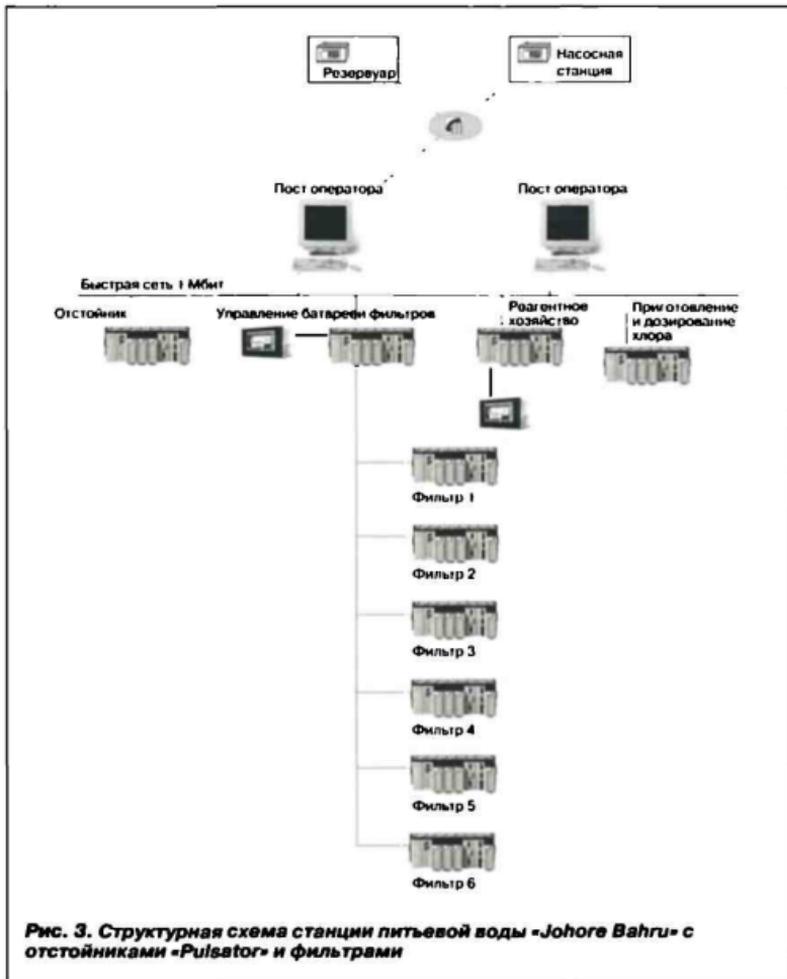
(рис. 3, станция «Johore Bahru»)

Эта станция с высоким уровнем автоматизации, которая осуществляется главным образом регулировкой фильтров **Aquazur** и управлением батареей фильтров. В предложенной технологии с отстойниками **Pulsator** и фильтрами **Aquazur** оператор может вручную управлять работой станции в смягченном режиме.

Для некоторых функций предусмотрена простая автоматизация в целях облегчения решения оператором таких задач, как регулировка pH или введение реагентов коагуляции-флокуляции пропорционально расходу исходной воды.

Управление промывкой фильтров полностью автоматизировано, и запуск режима промывки производится в зависимости от выбранных приоритетов: максимальное загрязнение фильтра, длительность цикла или по команде оператора.

Станция питьевой воды часто является также местом, с которого эксплуатирующая компания контролирует водопроводные сети, в том числе насосные станции. Для этого станция соединена с системами дистанционного контроля через коммутируемый телефонный канал.



■ Структура станции с применением мембранной ультрафильтрации (рис 4, станция ЮЗВС в Москве)

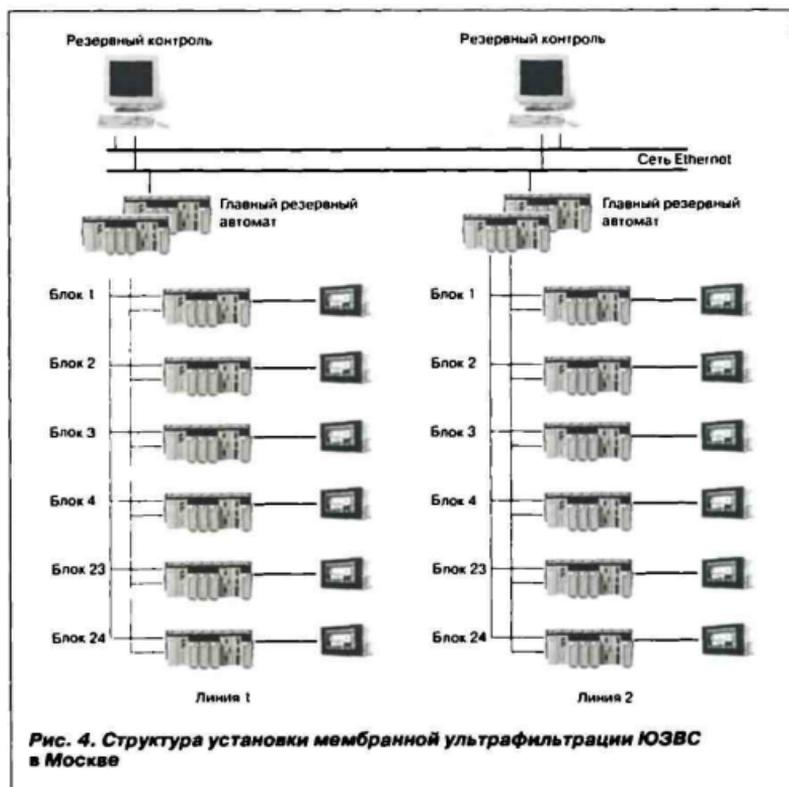
Структура станций с мембранной ультрафильтрацией, использующих модули **Aquasource** в блоках **Ultrazur**, строится согласно функциональной сегментации станции. На каждый блок ультрафильтрации (всего 56 блоков) компанией «Дегремон» установлен автомат с управляющим интерфейсом оператора. Такое решение позволяет управлять операциями по обслуживанию оборудования, установленного

в блоках, посредством автоматики. Ручное управление при этом запрещено, поскольку оно может привести к повреждению мембран.

Без автоматов оператор не имеет возможности управлять ни блоками, ни станцией.

Главный автомат, управляющий всеми блоками комплекса, координирует все операции: подачу воды, разрешение на промывку и т. д. Он играет первостепенную роль, и потому очень важно устанавливать **резервный автомат** с «теплым» или «горячим» резервированием (о резервном автомате см. выше).

На станциях такого типа оператору уже недоступен визуальный контроль за последовательностью стадий обработки воды, поэтому важно, чтобы у него имелась вся оперативная информация, необходимая для управления станцией. Система контроля и управления должна быть надежной и устойчивой. В этих целях компания «Дегремон» наряду с мерами по стандартизации блоков разработала **стандартное программное обеспечение** для автоматов блоков и главного автомата. Такой



подход позволил снизить стоимость оборудования, а также предоставил эксплуатирующей компании надежные и проверенные в промышленных условиях средства, которые дают больше функциональных возможностей, чем имела бы программа, специально разработанная для данной конкретной станции

Такая стандартизация основана на разграничении функций (рис. 5).

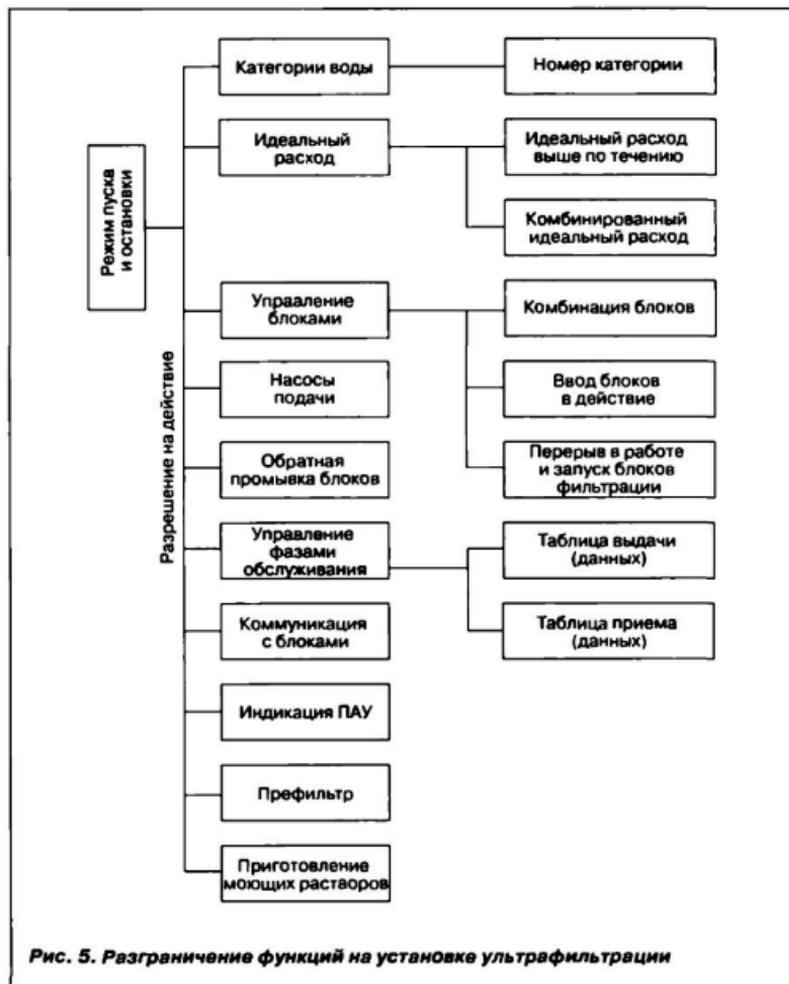


Рис. 5. Разграничение функций на установке ультрафильтрации

Программа разбита на элементарные технологические подфункции. Это позволяет выполнить на информационном уровне элементарные, более простые и точно определенные действия. Для каждой функции разрабатываются инструкция и анализ результатов ее реализации. Каждую функцию тестируют по отдельности, а затем проверяют ее взаимодействие со всеми другими функциями. Благодаря такому подходу разрабатываются программы для автоматов и для общего управления без лишних затрат времени и с большей точностью.

Для каждой функции, представленной на схеме прямоугольником, компания «Дегремон» разработала функциональные блоки согласно норме IEC 1131-3. После завершения этой разработки отпала необходимость в программировании элементарных функций, а проводится только конфигурация программ. Конфигурация элементарных функций осуществляется на основе критериев технологии и режимов работы станции (например, фронтальный или тангенциальный режим ультрафильтрации), а не собственных критериев автоматов.

Реализация такого структурного подхода требует диалога между специалистами по автоматизации и экспертами по технологии, а выделение функций является результатом функционального анализа процессов.

В завершение можно отметить, что в результате разработана стандартная программа для автоматов технологических блоков, которые сообщаются с главным автоматом центра управления. Это позволяет от проекта к проекту совершенствовать как технологический процесс, так и способ контроля и управления, что придает все более высокую надежность программному обеспечению автоматов.

2.1.2. Сточные воды

Рассмотрим работу очистных сооружений с активным илом и длительным временем пребывания — от 24 ч в режиме низких нагрузок и до 6 ч в режиме высоких нагрузок, когда реакции существенно зависят от возраста ила (от 1 до 10 сут). Затем рассмотрим системы, основанные на биофильтрах, имеющих различное назначение (С, N, DN и т. д.) и режимы работы с длительностью циклов от 10 до 48 ч. В течение этих циклов требуется выполнить множество операций для настройки таких параметров процесса, как число задействованных фильтров, скорость аэрации и др., в зависимости от объема сточных вод и их загрязненности (реальное время пребывания воды в биофильтрах ограничено 5–15 мин).

■ Структура очистных сооружений с активным илом

На сооружениях этого типа система контроля и управления руководит несколькими последовательными действиями, сигнализируя оператору о появлении отклонений либо в зале управления (контроля), либо на рабочем месте оператора.

Оператор всегда может перейти на ручное управление оборудованием. При этом никакого риска нарушить процесс или испортить оборудование нет. Технологические процессы допускают остановку на несколько часов, а запуск или остановка какого-либо одного элемента оборудования мало влияют на функционирование сооружения в целом.

Сложности вызывает техническое обслуживание щита управления (автомата) или интерфейса «человек-машина», поскольку остановка устройств управления не должна нарушать нормальной работы участков или сооружений. Автоматы и интерфейсы «человек-машина» должны быть распределены по функциям участков (сооружений), а не по месту их расположения, чтобы сократить длину кабельных соединений. Примером может служить структурная схема станции в Туре (рис. 6), где

наиболее проработанные функции связаны с обменом информацией в рамках системы контроля и управления — между системами наблюдения, компьютерного технического обслуживания и лабораториями и т. д.

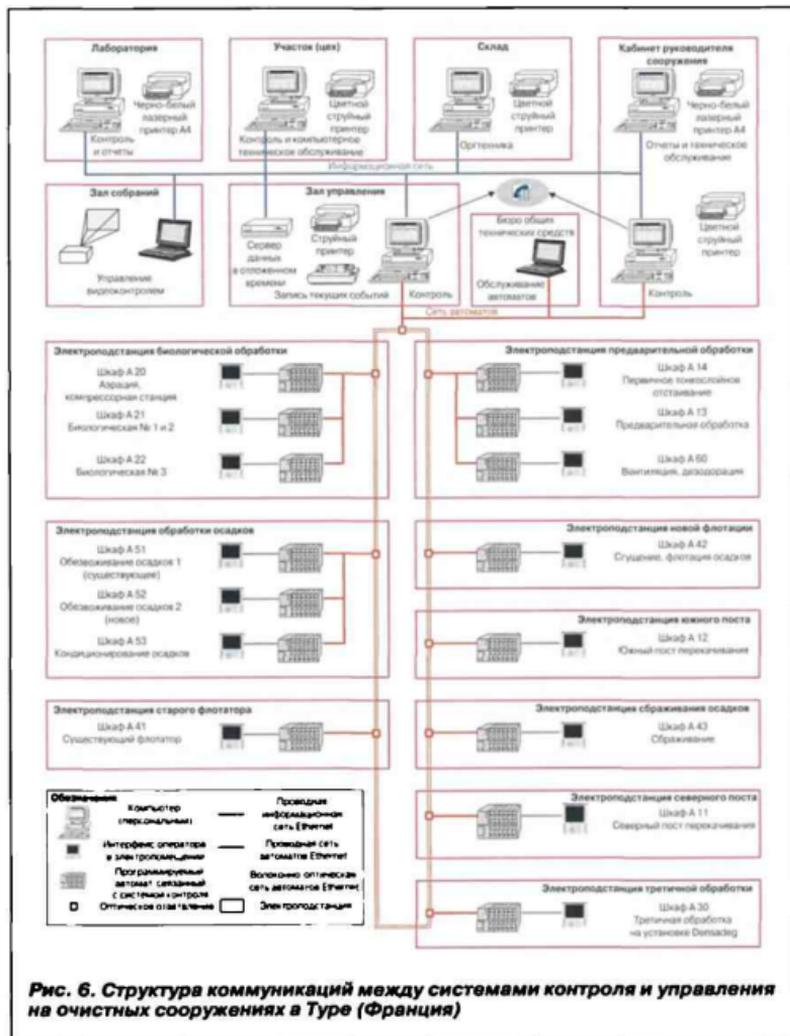


Рис. 6. Структура коммуникаций между системами контроля и управления на очистных сооружениях в Туре (Франция)

■ Компактные сооружения с биофильтрами

Сооружения с биофильтрами и зачастую сооружения с передовыми технологиями обработки осадков (сушка, сжигание и т. д.) обычно размещают в городской или чувствительной к загрязнению местности, и потому их воздействие на окружающую среду должно быть **строго ограничено**. К тому же чаще всего это сооружения закрытого типа, с вентиляцией и дезодорацией. Остановка вентиляции может повлечь за собой постепенное накопление H_2S выше допустимого уровня, что требует вмешательства оператора. Необходимые действия должны выполняться быстро.

Такие сооружения приспособлены для работы с переменными нагрузками по загрязнениям и объемам. В системе контроля и управления должна быть предусмотрена возможность изменения конфигурации процесса, например перехода от последовательностей фильтров два по два или три по три на параллельную работу всех фильтров, чтобы сооружение могло справиться с очень большими гидравлическими перегрузками. Поэтому последовательности переключения биофильтров сложны, особенно из-за множества учитываемых переменных величин.

На данном типе сооружений возможны три варианта структуры:

— по одному автомату на каждый биофильтр и один резервный автомат, управляющий батареей фильтров, с интерфейсами оператора на фронтальных автоматах и около основного оборудования (см. решение структуры 1 для фильтров Biofor, на рис. 7 «все параллельно»);



Рис. 7. Компактные сооружения с биофильтрами Biofor. Структура системы контроля и управления, решение 1. Пример очистных сооружений в Аннеси, Франция

— один резервный автомат с вынесенными входами-выходами и управляющими интерфейсами оператора, распределенными по сооружению (см. решение структуры 2 для фильтров Biofor на рис. 8);

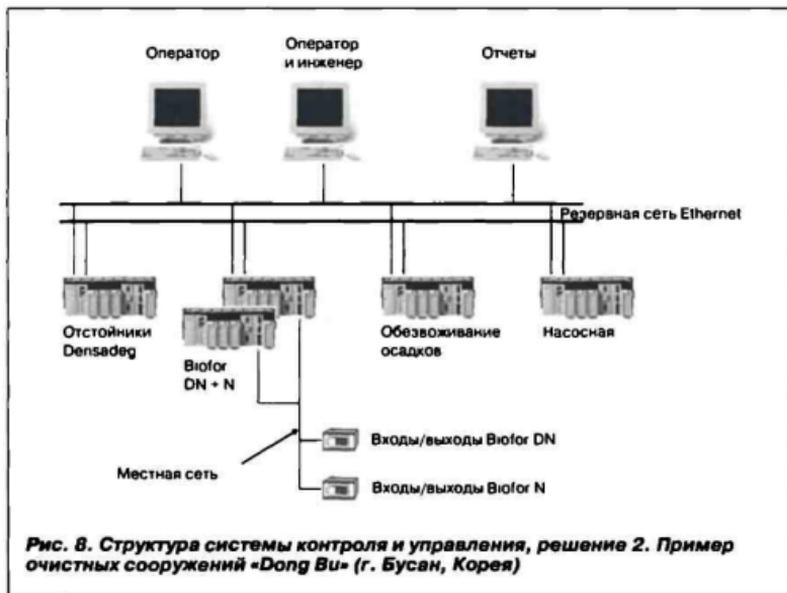
— один резервный автомат с задвижками, непосредственно связанными с местной сетью и управляющими интерфейсами оператора, распределенными по сооружению (см. решение структуры 3 для фильтров Biofor на рис. 9).

Преимущества решения 1:

- каждый фильтр автономен в своей работе;
- главный автомат определяет только приоритетность и число задействованных фильтров;
- простота эксплуатации и обслуживания.

Недостатки решения 1:

- при отказе главного автомата оператор не сможет управлять батареей (запуск промывки, определение числа действующих фильтров в зависимости от расхода сточных вод или их загрязненности и т. д.);
- требуется много автоматов с дорогостоящим обслуживанием

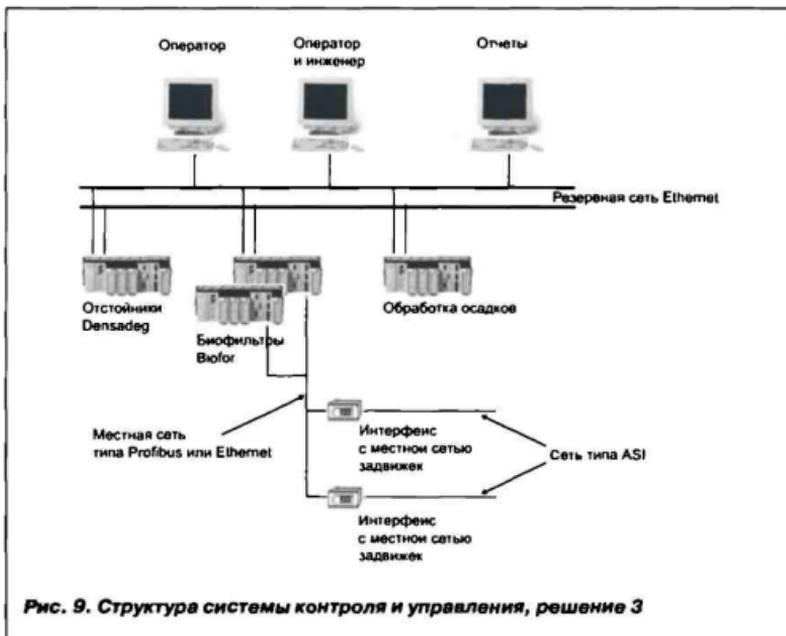


Преимущества решения 2:

- устойчивость и надежность,
- упрощение кабельной обвязки между задвижками и автоматом.

Недостатки решения 2:

- высокая стоимость реализации,
- сложное программное обеспечение главного автомата.



Преимущества решения 3

- надежность;
- упрощение кабельной обвязки за счет использования местной сети

Единственный недостаток этого решения — необходимость освоения операторами работы в местной сети

Выбор решения зависит от конкретных условий. Тем не менее мы больше рекомендуем решение 2 или 3.

2.1.3. Обработка осадков

Технология обработки осадков также развивается от систем механического обезвоживания с малым числом управляемых параметров до использования термических процессов, в которых либо сам технологический процесс, либо система обеспечения безопасности людей и защиты оборудования требуют скорости реагирования менее миллисекунды. Жесткие нормы выброса дыма, например, обуславливают функционирование систем на пределе их расчетных возможностей и необходимость применения систем контроля и управления, быстро выявляющих любые отклонения.

■ Структура «классического» решения (цех центрифугирования)

Использование современных центрифуг требует наличия управляющего интерфейса для проверки и регулировки. Но управление ограничивается последователь-

ными запусками-остановками и промывкой. Центрифуга сама, при помощи специального регулятора и без участия автомата, выполняет функцию обезвоживания осадков (о регулировке дифференциальной скорости см. гл. 18, п. 6.4).

■ Структура термической обработки

Процессы термической обработки в печах и сушилках осуществляются с использованием множества приборов. Для некоторых сушилок требуются автоматические программы с возможностью быстрой остановки в целях предотвращения случаев внезапного возгорания. Это трудные в эксплуатации, сложные автоматические программы. Для повышения надежности программ компания «Дегремон» разработала, по образцу, примененному ранее в ультрафильтрации, отдельные специальные модули. Но процессы термической обработки слишком разнообразны и потому не поддаются полной стандартизации. В результате ограничиваются включением в программу нескольких функциональных блоков, а остальную часть программы разрабатывают для каждого конкретного проекта.

2.2. Технологии управления

Реализуемые технологии управления должны быть направлены на облегчение условий применения, а также на упрощение обслуживания очистных сооружений операторами. В индустрии обработки воды наиболее распространены технологии, описанные ниже.

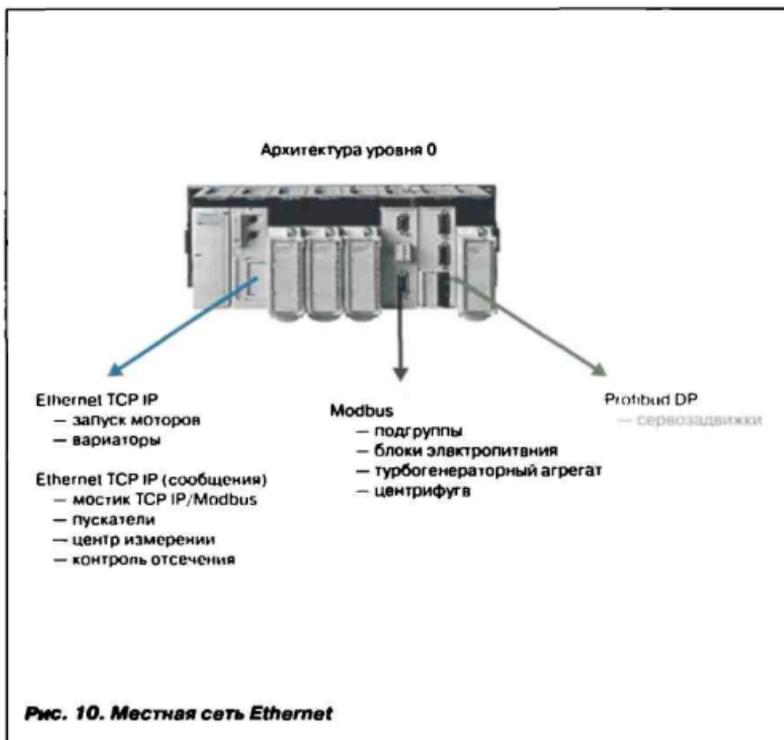
2.2.1. Местные (локальные) сети управления

Местные (локальные) сети (рис. 10) используются все более широко, так как позволяют упростить кабельные соединения и снизить расходы на установку, а также облегчают обслуживание (большая централизация управления). Особенно это выгодно в условиях ограниченной территории (менее 50 м) при использовании технологий, требующих множества датчиков и исполнительных устройств. Типичный пример — станции с блоками ультрафильтрации компании «Дегремон», где локальная сеть связывает автоматические вентили с автоматом на блоке. На станциях питьевой воды и сооружениях очистки сточных вод с активным илом имеется много выводов от моторов, и для экономии кабельной разводки целесообразно установить локальную сеть, соединяющую силовые щиты, выводы моторов и щиты автоматов управления.

Сетевые решения также выгодны для управления вентилями с моторизованными приводами, так как позволяют значительно сократить кабельную разводку между силовыми щитами и оборудованием с полным сохранением функциональности (пуск-остановка в обход автомата, местное и дистанционное управление и др.).

В технологиях с биофильтрами лучше использовать разнесенные вход-выход. Небольшое число параметров и сильная разбросанность очистных сооружений с активным илом не способствуют использованию локальных сетей в отношении датчиков расхода, давления, уровня и др.

Конструкции автоматов и электромеханического оборудования постоянно совершенствуются в целях подготовки надежных решений промышленного характера с меньшей стоимостью и более высокой функциональностью (измерение тока, косинуса φ и т. д.).



2.2.2. «Простые клиенты»

Структура системы контроля и управления должна изменяться в соответствии с изменениями организационной структуры эксплуатирующей компании, направленными на оптимизацию использования ее ресурсов

Насколько дорогостоящей и подчас неосуществимой была модификация системы контроля и управления еще несколько лет назад, настолько сейчас, с внедрением принципа **простых клиентов**, эксплуатирующие компании получили возможность совершенствовать организацию и рабочие места по своему усмотрению. Система контроля и управления больше не привязывает оператора к определенному месту (в центре контроля-управления, на сооружении или на удалении и т. д.), поскольку возможны любые варианты. Например, можно легко добавить еще один дополнительный управляющий интерфейс без модификации остальной системы.

Более того, данное решение позволяет снизить стоимость лицензирования в зависимости от числа интерфейсов. Например, на площадке очистных сооружений «Valenton» в регионе Парижа (рис. 11 и 12) на 60 интерфейсов управления приходится 20 лицензий

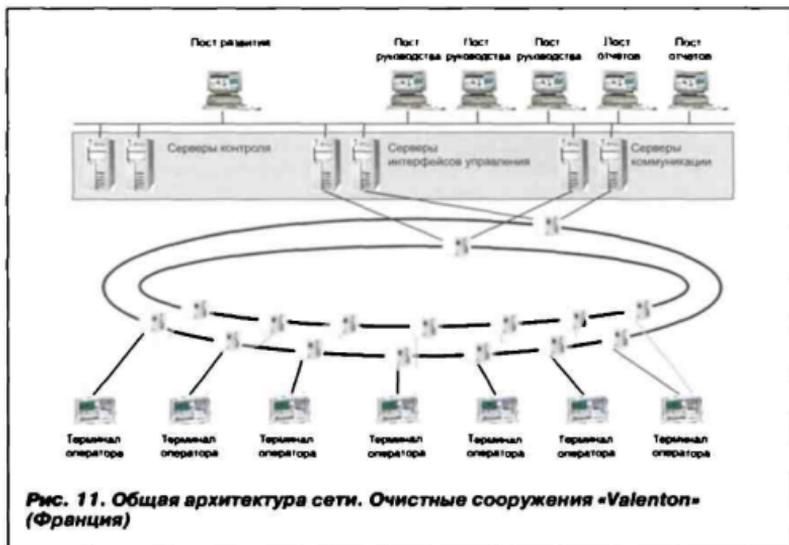


Рис. 11. Общая архитектура сети. Очистные сооружения «Valenton» (Франция)



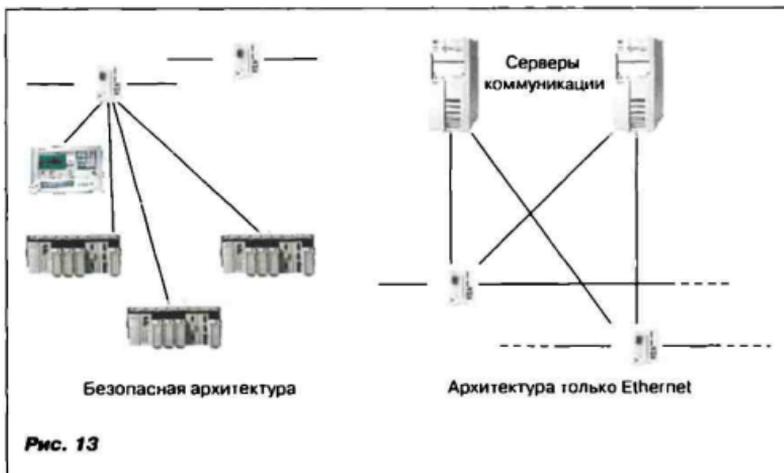
Рис. 12. Архитектура сети, уровень 2. Очистные сооружения «Valenton» (Франция)

2.2.3. Ethernet

Информационные технологии становятся все более необходимыми в области контроля и управления технологическими процессами. Именно поэтому сегодня сети, объединяющие автоматы, основаны на общепринятом промышленном стандарте Ethernet TCP/IP (см. структуру «Valenton» на рис. 13 и 14).

Этот стандарт позволяет поддерживать сети с любой архитектурой, от простейших до всеобъемлющих, каковы бы ни были размеры сооружений.

Стандарт Ethernet можно установить и на уже созданных сетях. При высокой скорости передачи данных (свыше 100 Мбит/с) не происходит потери информации даже в случае лавины тревожных сигналов.



2.2.4. Объектно-ориентированное программное обеспечение

Компьютерная аппаратура постепенно становится общедоступной, как и программное обеспечение.

Недавно появились на рынке и стали доступны для пользователей консоли программирования автоматов. Международные стандарты, в том числе IEC 61131-3, разработанные конструкторами автоматов, сегодня позволяют работать с функциональными блоками, облегчающими реализацию и испытания.

Объектно-ориентированное программирование (рис. 15) дает возможность стандартизировать элементарные функции и предоставлять оператору больше функций и, следовательно, возможностей. Каждой конкретной функции автомата соответствует функция контроля, а адреса автоматов соответствуют адресам контроля, что облегчает проверку и обслуживание.

Поскольку для функций управления моторами можно обеспечить все виды расчетов, они одновременно выполняются для всех моторов. В ходе эксплуатации сооружения эти функции могут быть легко обновлены для добавления или модификации технологических процессов.



Объектно-ориентированный подход в программировании в сочетании с функциональной сегментацией сооружения позволяет структурировать кодирование адресов автоматов и тем самым облегчить обслуживание

2.2.5. Цифровая система контроля и управления или решение с автоматами-контроллерами

Это один из часто возникающих вопросов. На «классических» сооружениях технологические процессы протекают медленно, параметров измерения немного, время отклика может достигать нескольких часов. Поэтому контуров регуляции мало, и последовательность действий имеет комбинаторный тип, или Graphset. В подобных случаях логично выбрать решение, наиболее подходящее к таким характеристикам придание автоматам функции контроля.

Удовлетворяя потребности заказчиков, компания «Дег ремонт» реализовала сотни установок с такой системой. Достоинства данного решения состоят в возможности быстро вступать в управление оборудованием при каких-либо нарушениях и легко внедрять новые достижения информатики (Интернет, «простые клиенты»).

Огромное преимущество решения с автоматами-контроллерами заключается, кроме того, в том, что оно знакомо многим пользователям в плане обслуживания и реализации.

К достоинствам цифровой системы контроля и управления (SNCC — Systeme numérique de contrôle-commande) можно отнести лучшее структурирование программ (использование функциональных блоков из библиотеки, всесторонний охват параметров и др.) и прозрачность управления коммуникациями между интерфейсами управления (уникальные описания узлов в сети). Но введение цифровой системы контроля и управления оправдывает себя только на крупных сооружениях (контроль более 10 тыс. переменных величин).

Фактически технологические различия между цифровой системой управления и решением с автоматами-контроллерами стираются, оба решения в настоящее время основаны на одних и тех же стандартах:

- операционная система Windows,
- сеть Ethernet,
- стандарт IEC 61131-3 для программирования в реальном времени.

Решение выбирается чаще всего на основе человеческого фактора (квалификация операторов) или экономических критериев (цена, расходы), а не по техническим показателям.

3. Управление сооружением в отложенном времени

3.1. Программное обеспечение для отчетов: Aquascal

Качество воды характеризуется множеством параметров. Лишь некоторые из них можно определять на линии обработки.

Для определения качества исходной и обработанной воды необходимо проведение лабораторных анализов. Однако оператор не имеет этой информации в реальном времени, поэтому он не может контролировать качественные параметры функционирования сооружения.

Оптимизация технологических процессов сооружения все больше зависит от программного обеспечения для отчетов, позволяющего ежедневно проверять соответствие параметров обработки и экономические показатели. Компания «Дегремон» стандартизировала эту процедуру и предлагает ее для любых сооружений.

Программа **Aquascalc**, предназначенная для операторов сооружений обработки воды, является гибким параметрическим средством, позволяющим

- автоматически собирать и сохранять все технические данные,
- подтверждать эти данные в плане обеспечения гарантии их надежности,
- распечатывать эти данные в форме отчетов и балансов, периодически или по запросу (в программе Excel)

■ Функциональные возможности программы **Aquascalc**

Сбор данных: позволяет работать со множеством источников внешних данных (Supervision, Excel, текстовые файлы и все ODBC-совместимые базы данных Access, Oracle и т. д.)

Долгосрочное хранение: позволяет архивировать собранные и расчетные данные. Информация сохраняется в собственных файлах **Aquascalc** или в любых ODBC-совместимых базах данных (Access, Oracle). Долговечность архивирования составляет несколько лет.

Автоматическое подтверждение данных: каждому параметру можно назначить свой способ подтверждения. Так, каждый результат измерения от датчика проверяется по трем критериям

- величина (находится ли она в допустимых пределах),
- вариативность (находится ли скорость изменения в допустимых пределах),
- постоянство (достаточно ли постоянна величина за определенный отрезок времени)

Общий индекс достоверности, сочетающий три указанных критерия, присоединяется к каждой величине. Затем она автоматически подтверждается как достоверная или недостоверная в зависимости от своего индекса достоверности, для которого по каждому из параметров оператором установлены верхнее и нижнее пороговые значения.

При расчете общего индекса достоверности могут учитываться также условия измерения, которые определяются одним, двумя или тремя датчиками типа «все или ничего». Каждый из датчиков устанавливает достоверность результата по критерию.

- готовность (проводится ли в данный момент операция проверки или обслуживания),
- коммуникация (действует ли канал передачи данных),
- процесс (исправен ли датчик)

Если на конкретную дату хотя бы один из этих критериев не выполняется, индекс достоверности данных датчика приравнивается к нулю.

Коррекция данных: после завершения этапа автоматического подтверждения данных оператор имеет возможность откорректировать те из них, которые признаны недостоверными, с помощью графического редактора кривых или табличного редактора.

Формирование отчетов: программа **Aquascalc** позволяет легко создавать и распечатывать отчеты в форме листов Excel. Издание отчета также можно планировать и выполнять в автоматическом режиме к определенной дате.

Доступ к данным и отчетам: представление данных выполняется в виде графиков или таблиц. Модуль удаленного доступа позволяет любому пользователю в сети предприятия просматривать данные и отчеты с помощью программы-проводника (Internet Explorer или Netscape Navigator).

Кроме своих широких функциональных возможностей это программное обеспечение для отчетов обладает простой эргономикой, не требующей глубоких познаний в информатике

3.2. Техническое обслуживание

Долгое время к сооружениям по обработке воды не относились как к полноценным промышленным площадкам, и их техническое обслуживание считалось второстепенной операцией, а иногда и вовсе ненужной

Потребность в полноценном управлении этими объектами с растущей технической сложностью, а также стремление ко все большей надежности их работы способствовали тому, что техническое обслуживание стало стратегической задачей, выполнение которой обеспечивает

- непрерывность предоставления услуг, а значит, и постоянное качество обработки,
- рентабельность инвестиций за счет продления срока службы оборудования

Цель ясна: оптимизировать функциональную готовность при минимальной общей стоимости эксплуатации (рис 16)



Для достижения наибольшей эффективности обслуживания требуется

- собрать технические характеристики всего оборудования,
- определить необходимые операции по обслуживанию, их особенности, частоту и длительность выполнения,
- обеспечить наличие средств планирования и контроля,
- создать и поддерживать склад запасных частей;
- оценить статистически надежность и стоимость обслуживания каждой единицы оборудования;
- распечатывать показатели эффективности для ее оценки

В настоящее время для этого все чаще применяют программное обеспечение для управления компьютерным техническим обслуживанием (т.е. техническим обслуживанием)



живанием, выполняющимся с помощью компьютеров (фр GMAO — *gestion de maintenance assistée par ordinateur*) (рис 17)]

3.2.1. Управление компьютерным техническим обслуживанием

Рынок программного обеспечения в этой области может показаться переполненным, однако предлагаются главным образом прикладные программы, имеющие довольно широкий спектр возможностей, для применения в крупной промышленности (автомобильной, нефтяной и др.) Они обладают мощными, зачастую чрезвычайно обширными функциями. Структура этих программ слишком сложна для целей обработки воды, а экран управления перегружен и трудновоспринимаем.

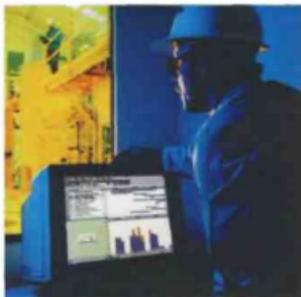
В такой ситуации кажется заманчивым попытаться использовать программы контроля для запуска операций обслуживания. Однако этот подход ограничен и не является верным управленческим решением, поскольку все аспекты наблюдения за состоянием оборудования и статистики почти систематически остаются в стороне.

Таким образом, программное обеспечение для управления компьютерным техническим обслуживанием обеспечивает тщательность контроля за оборудованием и позволяет выявлять слабые звенья сооружения. Оно может даже поставить под вопрос, иногда спасительный, имеющуюся практику обслуживания. В частности, оно требует обновления номенклатуры оборудования с предоставлением подробных сведений о необходимом техническом обслуживании.

Поэтому управление компьютерным техническим обслуживанием прекрасно вписывается в систему управления качеством.

Не стоит также забывать о **человеческом факторе**, поскольку функционирование программ обеспечения для управления компьютерным техническим обслуживанием предполагает **строгую обратную информационную связь**. Поэтому внедрение программы требует, чтобы операторы были также задействованы в процессе управления и понимали важность этого инструмента.

В первую очередь программа должна быть простой и интуитивно понятной, а также не должна включать слишком детальный перечень обслуживаемого оборудования и операций обслуживания, поскольку при этом значительно возрастает объем вводимых данных, необходимое для этого время и т. д.



3.2.2. Программа Aquamaint

Программа **Aquamaint** была разработана компанией «Дегремон» для удовлетворения перечисленных выше потребностей (см. п. 3.2). Кроме того

- ее эргономика соответствует признанным стандартам в области информатики и при этом имеет структуру, упрощающую использование и настройки,
- гибкость функций программы позволяет приспособить ее к потребностям крупных объектов с различной структурной организацией,
- программа **Aquamaint** хорошо взаимодействует с другим программным обеспечением (например, контрольным и др.),
- открытость этой программы позволяет вводить стороннюю информацию (например, цифровые документы, чертежи, фотографии и др.).

Программа **Aquamaint** предлагает все необходимые и достаточные функции для полного управления техническим обслуживанием (см. рис. 17). На сегодняшний день ее используют на сотнях сооружений мощностью от 10 000 до 2 000 000 ЭЖ.

Заключение

Различные решения, разработанные компанией «Дегремон» в области промышленной информатики и структур автоматизации, объединены в одной схеме на рис. 18, включающей

- классический интерфейс управления **Supervell** с сенсорным экраном **Tactiveit**, стационарным или мобильным. Разнообразные интерфейсы разработаны и устанавливаются с наилучшим соответствием к потребностям сооружений обработки воды;
 - управление на местах, сочетающее классические решения (**Aquavell**) с решениями типа «простые клиенты», позволяющее дистанционно «увидеть» сооружение в целом и, следовательно, точнее проанализировать неисправности,
 - предоставление заказчикам возможности широкого публичного распространения информации о деятельности сооружений обработки воды,
 - обмен информацией, а также совместное применение программного обеспечения с полезной возможностью централизации информации.
- Компания «Дегремон» имеет и опыт, и технические решения, отвечающие разнообразным потребностям заказчиков.

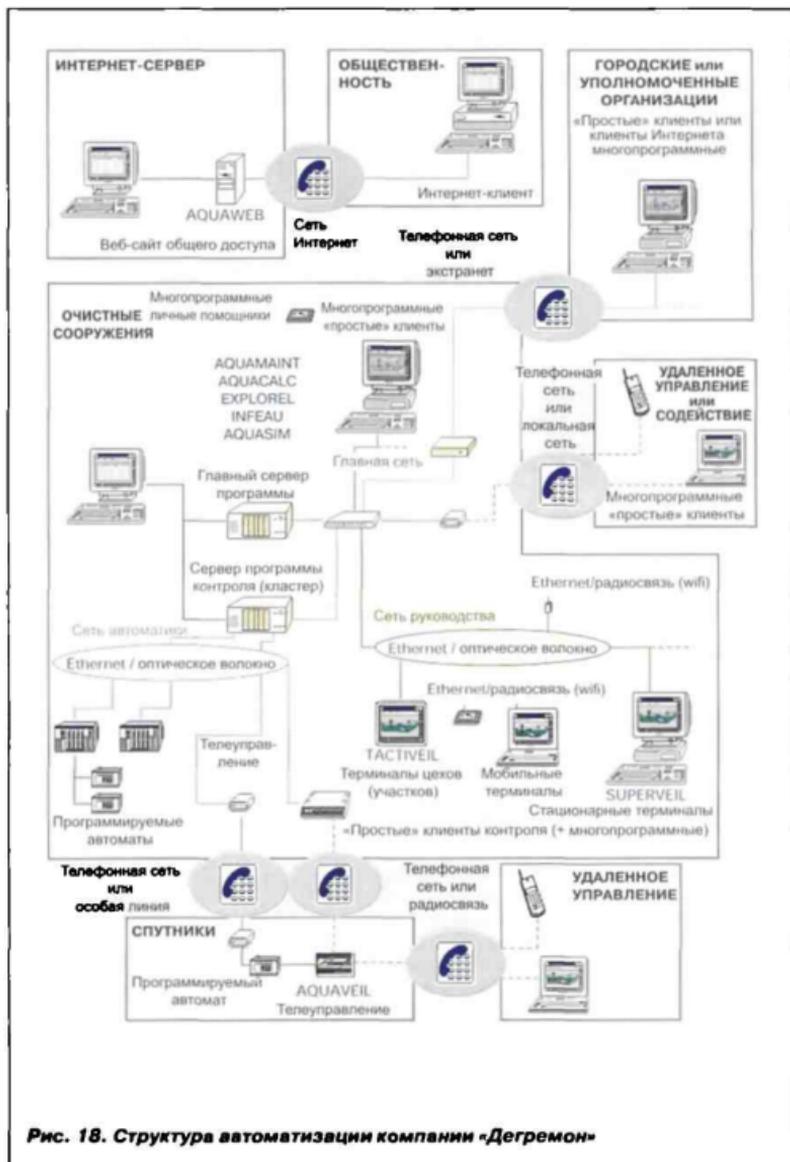


Рис. 18. Структура автоматизации компании «Дегремон»



Глава

22

ВВЕДЕНИЕ	1419
1. ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЛИНИИ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД	1420
2. СПЕЦИФИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА	1466
3. ИЗМЕНЕНИЕ КАЛЬЦИИ УГЛЕРОДНОГО РАВНОВЕСИЯ	1507
4. КОМПАКТНЫЕ СТАНДАРТНЫЕ УСТАНОВКИ	1519
5. РЕКОНСТРУКЦИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ СТАНЦИИ	1523

Обработка ПИТЬЕВОЙ ВОДЫ

Введение

Задача данной главы состоит в том, чтобы показать, как путем комбинирования различных технологий можно составлять «технологические линии» для обработки даже самых сложных пресных вод в целях производства питьевой воды (обессоливание солоноватых и морских вод рассмотрено в гл. 15, п. 4.2)

При этом читатель может обратиться к гл. 3 и 4, в которых изложены теоретические основы используемых физико-химических и биологических процессов, а также к главам, в которых описываются конкретные технологии и технические средства компании «Дегремон», в частности отстойники-флотаторы (см. гл. 10), фильтры (см. гл. 13), мембраны (см. гл. 15), окисление и обеззараживание (см. гл. 17)

Обычно различают три основных типа доступных водных ресурсов (см. гл. 2)

— **поверхностные воды**, более или менее загрязненные взвешенными веществами (ВВ), органическими или неорганическими коллоидными или неколлоидными, в том числе водорослями в быстро изменяющихся количествах, растворенными органическими веществами (ОВ), природными или искусственными частью из которых обуславливают цветность патогенными организмами (вирусами, бактериями, простейшими паразитами и др.) и иногда минеральными веществами, такими как тяжелые металлы и др.

— **глубоко лежащие подземные воды**, обычно свободные от суспензии, патогенных организмов и ОВ (кроме природных), но очень часто содержащие восста-

новленные соединения, такие как соли Fe(II), Mn(II), NH_4 и др., даже токсичные минеральные вещества, такие как As, Se, F и др., радиоактивные элементы или элементы, просто имеющие избыточную или недостаточную жесткость, избыточное содержание (Cl^- , SO_4^{2-}), а также нитраты и др. Надо заметить, что эти загрязнения требуют особой обработки, в отличие от поверхностных вод, к которым применяется более общая обработка (осветление, глубокая доочистка, обеззараживание).

— промежуточные между этими двумя типами — воды инфильтрационных водоносных горизонтов, находящихся «под влиянием» поверхностных вод. воды неглубоких водоносных горизонтов, карстовые воды и др., которые часто прозрачны, но могут быстро мутнеть и содержать все прочие загрязнения, характерные для поверхностных и подземных вод

Примечание Можно также выделить четвертый тип **сточные воды, повторно используемые для нужд человека**, главным образом косвенным путем (закачивание в водоносные горизонты, подача в резервуары для производства питьевой воды и др.) Следует иметь в виду, что в них сочетаются некоторые загрязнения первых двух типов вод с очень значительной ролью ОВ искусственного происхождения. Для обработки этих вод в основном применяются технологии, описанные в гл. 11 и 24 (биологическая обработка) и 15 (мембранные технологии)

Чтобы сделать воду питьевой, существует целый набор технологий, из которых практически ни одна не направлена на удаление только какого-либо одного класса перечисленных выше загрязнений. Это подтверждает табл. 1, где значком X помечены процессы, которые играют **главную роль** в удалении того или иного типа загрязнений, а значком x — дополнительные процессы, которые также могут этому способствовать

Как подчеркивалось ранее, эти процессы и технологии имеют различную стоимость (инвестиции и эксплуатационные затраты), различные пределы применения, разную эффективность. Таким образом, выбор оптимальной технологической линии обработки зависит только от искусства инженера-разработчика, для которого в настоящей главе приводятся многочисленные примеры составления технологических линий в той или иной ситуации.

Примечание **Удаление отходов** (осадков, насыщенных адсорбентов, продуктов промывки мембран и др.), с предварительной обработкой или без нее, является неотъемлемой частью технологической линии обработки воды и **должно** потому учитываться при выборе наилучшего экономически обоснованного варианта

Из табл. 1 следует, что **мембраны** осветления и/или обессоливания имеют очень широкий диапазон применения, чем и объясняется все более частое их использование либо для замены обычных технологий обработки (фильтрации карстовых вод, обеззараживания), либо в качестве дополнения к ним в сложных линиях обработки вод с достаточно высокой степенью загрязнения.

В зависимости от характеристик обрабатываемой воды и эффективности того или иного процесса специалист по обработке воды может из «элементарных» стадии формировать так называемую технологическую линию

1. Технологические линии обработки поверхностных вод

Как уже упоминалось, некоторые подземные воды, находящиеся «под влиянием поверхностных вод», должны быть также отнесены к категории поверхностных вод

Таблица 1

Загрязнение / Процесс технологии	Взвешенные вещества	Коллоиды	Органические растворенные вещества		Патогенные микроорганизмы	Специфические параметры эффективности
			Природные ОВ гуминовые кислоты	Искусственные ОВ (микрозагрязнение пестициды и др.)		
Грязеотделение / пескоулавливание	X					
Процеживание	X					
Коагуляция / Флокуляция	X	X	X	X	X	(Металлы) X (Водоросли) X
Фильтрация	X	X			X	(Водоросли) X
Биологическая обработка на фильтрах	X	X	X	X	X	(NH ₄ NO ₃ Fe Mn H ₂ S и т.д.) X
Адсорбция (ПАУ ГАУ ¹)	X		X	X	X	(Тяжелые металлы) X
Окисление-обеззараживание (Cl ₂ O ₃)			X	От х до X	От х до X	(Fe Mn, As) X с последующим отделением
Окисление-обеззараживание (ультрафиолетовое облучение)				X	X	
Мембраны осветления (УФ ²)	X	X	X		X	
Мембраны УФ + адсорбент (способ Cst3W)	X	X	X	X	X	
Мембраны обессоливания (нанофильтрация, обратный осмос)			X	X	X	Все ионы X
Ионный обмен			X	От х до X		(NO ₃ жесткость) X
Аэрация				От х до X		(H ₂ S) X

ПАУ – порошковый активированный уголь. ГАУ – гранулированный активированный уголь.
УФ – ультрафильтрация.

На рис. 1 и 2 приведены стадии обработки, применяемые прежде всего в **предварительной обработке** воды, затем в **полной обработке** и наконец в **доочистке**.

Легко заметить, что существует очень много возможных решений, реализация которых должна следовать простым правилам, состоящим в том, чтобы учитывать в **каждом отдельном случае** эффективность удаления различных загрязнений на каждой стадии в зависимости:

- от состояния, в котором они присутствуют в воде:
 - всплывающие;
 - взвешенные (отстаиваемые естественным путем);
 - коллоидные (отстаиваемые после коагуляции);
 - растворенные,
 - ионы;

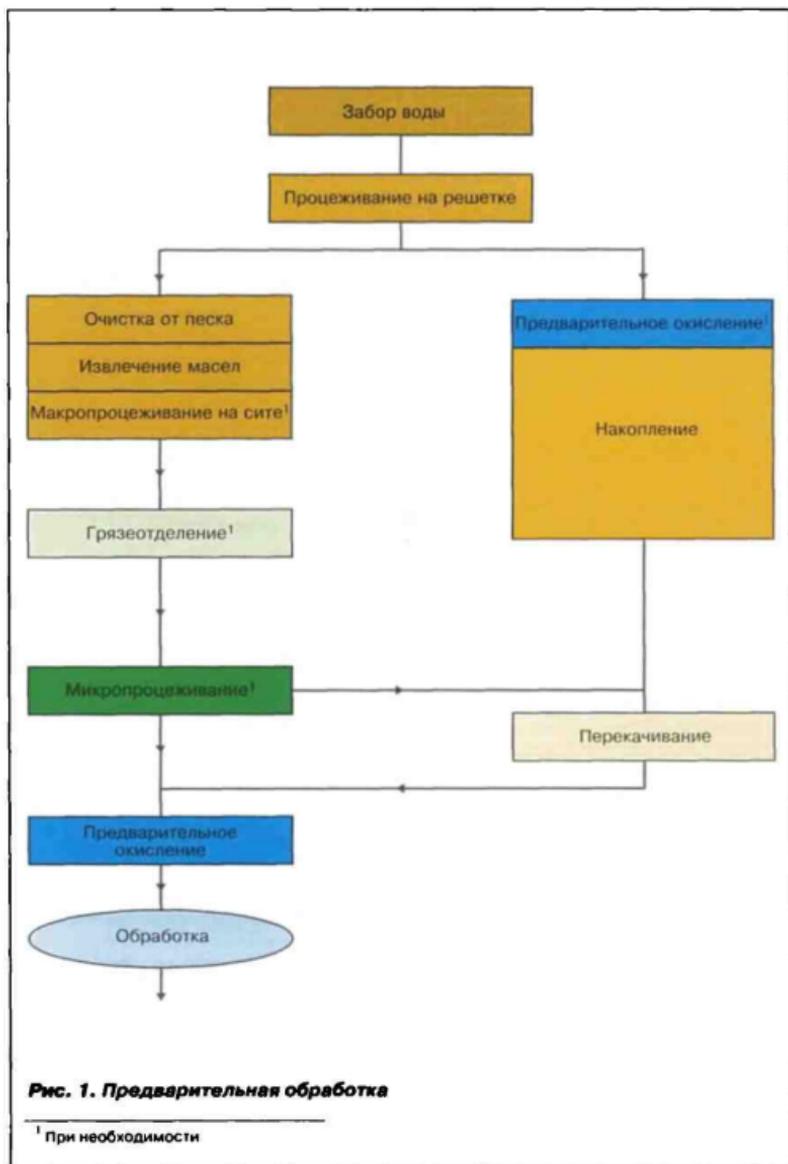
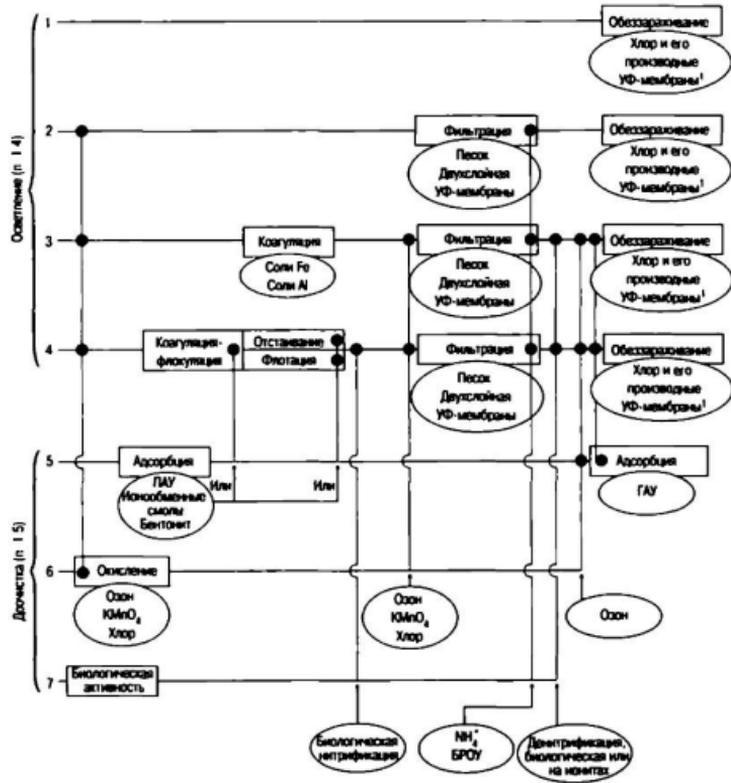


Рис. 1. Предварительная обработка

¹ При необходимости



Линей 1 (см п 16)
 Линей 2 (см п 14 1)
 Линей 3 (см п 14 2)

Линей 4 (см п 14 3)
 Линей 5 (см п 15 2)
 Линей 6 (см п 15 1)

Линей 7 (см п 15 2 3)

Примечание: Линей 5, 6 и 7 предназначены для дополнения классической технологической линии обработки, в местах, помеченных красными точками

Рис. 2. Базовые стадии технологических линий обработки поверхностных вод

¹ Технологическая линия с двумя последовательными мембранами осветления не является ни полезной, ни экономичной. Напротив, добавление порошкообразного адсорбента, как в способе Cristal, часто более предпочтительно (см. пп. 17 2 и 17 3).

- от их размера (для ВВ).
 - > 150 мкм. макропроцеживание и/или удаление песка,
 - 150–10 мкм грязеотделение (микропроцеживание для особых случаев),
 - < 10 мкм. осветление,
- от их вида
 - коллоидные (коагуляция-флокуляция и/или мембрана осветления),
 - растворенные (окисление, и/или адсорбция, и/или биологическое разложение);
 - ион (осаждение и/или мембрана обессоливания);
 - патогенные микробы (химическое обеззараживание, облучение, мембрана).

Кроме этого, следует проверить, что включение п стадий обработки, имеющих наилучшее соотношение эффективность/стоимость, позволит достигнуть поставленной цели (нормы, надежность и др)

1.1. Хранение исходной воды

Хранение исходной воды представляет интерес:

— при продолжительной засухе, когда понижается количество воды в природных водоемах и часто изменяется ее качество Объем запасаемой исходной воды должен соответствовать потребности в ней в течение предполагаемого наиболее длительного периода.

— когда имеется риск случайного загрязнения, который может ухудшить качество исходной воды неприемлемым для станции образом. Наличие запаса воды позволит в этом случае не только остановить ее подачу из природного водоема, но и избежать остановки производства. Объем запасаемой воды в случае ее забора из реки определяется рисками загрязнения выше по течению от места водозабора и максимальной предполагаемой длительностью остановки прямой подачи исходной воды;

— когда характеристики природного водоема подвергаются быстрым и частым изменениям (взвешенные вещества, NH_4 и др), которые вызывают необходимость корректировки условий эксплуатации, не всегда соответствующих реальным возможностям

Однако в географических и климатических условиях, благоприятных для жизни планктона, накопление исходной воды может представлять определенные неудобства. Установлено, что, если время хранения невелико (несколько дней), происходит развитие водорослей и акциномицетов, продукты жизнедеятельности которых могут придавать воде неприятный привкус и/или запах, и их устранение может стоить очень дорого. При более длительном пребывании воды в накопителе (месяц) развивается зоопланктон, способный уменьшить некоторые из этих проблем. При этом некоторые характеристики воды могут улучшиться: уменьшается содержание ВВ, аммония и бактериальной флоры

Для хранения исходной воды необходимо отводить большие территории, что сопряжено со значительными издержками и в городской среде нереально, кроме того, может потребоваться периодическая чистка накопителя.

Наконец, создание запасов воды в больших количествах (водохранилища плотин и др) требует особой предосторожности при заполнении водохранилищ во избежание явлений бурной эвтрофикации необходимо удалить и сжечь всюкую растительность вне периметра заполнения, освободить площадь хранения воды от почвы и всех возможно ранее существовавших отложений загрязнений (оставшихся после свалок, складов химических продуктов и др.).

1.2. Забор воды

Правильная концепция водозабора — отправная точка обработки воды

Когда речь идет о подземной воде, прежде всего нужно позаботиться о правильном каптаже (отводе воды в трубу) или закачке, при которых с водой попадает минимум земли и песка. Необходимо также определить достаточный **размер охранной зоны** (см соответствующее местное законодательство)

В случае забора воды из природного водоема нужно учесть влияние различных элементов, которые может содержать исходная вода, и в каждом конкретном случае определить необходимую **предварительную обработку** непосредственно на водозаборе, в особенности когда он отдален от водопроводной станции

1.2.1. Концепция сооружений водозабора

В озере с почти постоянным уровнем воды высотная отметка ее забора должна быть выбрана таким образом, чтобы в течение всего года содержание в ней ВВ, коллоидных веществ, железа или марганца и планктона было максимально низким

Если озеро достаточно глубокое, целесообразно отбирать воду на глубине 30–35 м от поверхности, поскольку из-за слабой освещенности в ней ограничено содержание планктона, прежде всего в период его интенсивного развития. В то же время необходимо, чтобы водозабор осуществлялся по меньшей мере на уровне 6–8 м выше дна, что позволяет избежать сильного влияния донных течений и перемещений осевших на дно частиц

Следует, наконец, учитывать возможность «перемешивания» вод озера, происходящего под влиянием изменений температуры (явление конвекции)

В водозаборах на водохранилищах с переменным уровнем воды необходимо устанавливать вертикальные водоприемники, допускающие отбор воды с разной высоты в зависимости от времени года, впрочем, эта мера часто желательна и при постоянном уровне воды — в случае сезонных изменений физико-химического и биологического состава воды (фото 1)

В водозаборе, построенном на реке, должна быть предусмотрена защита от несомых течением частиц земли, песка, листьев, камышей, травы, обломков упаковок, плавающих предметов, пленки пены или углеводородов и т. д. Не



Фото 1. Установка забора воды во время опорожнения водохранилища в Себрон-Пуи Терри (Де-Севр, Франция). Производительность 36 000 м³/сут

существует идеальной модели водозабора, но есть типы водозаборов, приспособленные не только к поверхностной загрязненности реки, но и к ее характеру, природе и особенностям берегов, а также к возможностям навигации и с обеспечением удобного доступа на сооружение. Характер реки может привести к необходимости водозабора с глубины, бокового водозабора, забора воды сифоном и даже из колодца на берегу и т. д. Таким образом, каждый случай требует особого рассмотрения.

1.2.2. Предварительная обработка на водозаборе

Первая возможная обработка — грубая очистка в целях отделения загрязнений крупных размеров, способных помешать процессам последующей обработки. Она может включать (см. гл. 9)

- **процеживание на решетке**,
- **макропроцеживание** (обязательно, если в воде находятся трава, листья, пластмассовая упаковка и др.). Удаление задержанных загрязнений должно быть автоматическим. Отсутствие соответствующего оборудования из экономических соображений является причиной неприятностей на многих заводах питьевой воды (водопроводных станциях), особенно в случаях напорной подачи исходной воды,
- **очистку от песка**, которая в зависимости от условий водозабора может предусматриваться до или после возможного процеживания. Подобная очистка необходима, когда оборудование, используемое для последующей обработки, очень чувствительно к наличию в воде значительного количества песка,
- **удаление масел** с поверхности воды,
- **грязевотделение**, которое требуется в тех случаях, когда количество ВВ в исходной воде (грязь, глина и др.) превосходит допустимые значения и исключается возможность их извлечения отстойниками, расположенными далее в технологической линии обработки (больше нескольких граммов ВВ на литр), этот аспект двухступенчатого отстаивания изложен в п. 1.4.3.1

Если водозабор находится на значительном расстоянии от станции обработки, должна быть обязательно проработана защита подающего трубопровода:

- от гидравлического удара,
- от заиливания (песком, глиной и др.),
- от закупорки (ракушками, ферробактериями и др.);
- от появления в воде неприятного привкуса (из-за водорослей, ОВ, органических остатков)

Часто рекомендуется предварительное хлорирование, которое следует применять с большой осторожностью, поскольку, несмотря на большую его эффективность, оно часто приводит к возникновению неприятного привкуса (например, из-за хлорфенола и некоторых водорослей) и, прежде всего, к образованию нежелательных соединений, таких как тригалогенметаны, которые очень трудно удаляются при последующей обработке.

«Шокное» хлорирование повышенными дозами, но с перерывами может применяться, так же как и непрерывное хлорирование, ниже точки излома (см. гл. 3, п. 12), когда исходная вода содержит ионы аммония.

1.3. Предварительное окисление

В зависимости от температуры и расстояния предварительное окисление осуществляется либо на водозаборе, либо на станции обработки воды.

1.3.1. Аэрация

Аэрацией называется операция, цель которой — компенсировать дефицит кислорода в исходной воде или освободить воду от нежелательных или избыточных газов (H_2S , CO_2).

Если эта операция осуществляется на открытом воздухе, содержание кислорода в воде увеличивается по мере удаления углекислого газа. Это надо учитывать при работе со средне- и сильноминерализованными водами, поскольку удаление равновесного CO_2 может сделать воду способной к образованию накипи. В таком случае лучше выбрать напорную аэрацию, во время которой концентрация CO_2 не меняется, в то время как концентрация O_2 увеличивается.

1.3.2. Химическое окисление

Химические реагенты, применяемые для окисления, описываются в гл. 3, п. 12, а протекающие при этом процессы — в гл. 17.

1.3.2.1. Предварительное окисление хлором

Как известно, в присутствии ОВ предварительное хлорирование сопровождается образованием нежелательных соединений, поэтому предпочтительно относить точку хлорирования как можно дальше в технологической линии обработки после максимально возможного удаления ОВ, присутствующих в воде.

Предварительное хлорирование может, следовательно, проводиться только в том случае, если вода не содержит в значительных концентрациях исходные вещества для образования нежелательных соединений; его применяют, если есть опасность развития водорослей в сооружениях осветления, если требуется удалить ионы NH_4^+ или перевести двухвалентное железо в трехвалентное (закисное в окисное). Его можно также использовать на промежуточной стадии, например для воды после отстаивания, чтобы предотвратить развитие организмов (бактерий, водорослей, зоопланктона и др.) на фильтрах.

1.3.2.2. Предварительное окисление хлораминами

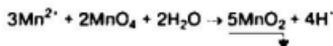
Если исходная вода не содержит аммония, можно планировать введение в воду хлораминов, предварительно получаемых действием хлора на аммиак или сульфат аммония.

1.3.2.3. Предварительное окисление диоксидом хлора

Этот метод был разработан в целях замены хлора на стадии предварительного окисления. В самом деле, если диоксид хлора не окисляет аммоний, то не образуются тригалогенметаны. Но, с другой стороны, реагируя с природными органическими соединениями, он выделяет хлорит-ионы ClO_2^- , которые необходимо впоследствии удалить. В соответствии с новыми нормами Франции (Декрет 2003-461) использование диоксида хлора в предварительном окислении постепенно прекращается.

1.3.2.4. Предварительное окисление перманганатом калия

Этот окислитель используют только в особых случаях, когда исходная вода содержит марганец, который он осаждает:



Повышенный уровень pH увеличивает скорость реакции, отсюда следует необходимость регулировать величину pH (>7,0) и обеспечивать достаточное время контакта (5–10 мин).

В случае слабоминерализованной воды, содержащей большое количество растворенных ОВ, для которой требуется очень низкое значение pH коагуляции (5,5–6), предпочтительнее вводить $KMnO_4$ между отстойником и фильтром после повышения уровня pH до благоприятной величины (7,0–7,5)

Перманганат калия иногда используется также и для частичного окисления некоторых ОВ, для удаления неприятного привкуса или для борьбы с развитием водорослей в сооружениях осветления

Использование $KMnO_4$ на стадии предварительного окисления требует точного регулирования вводимой дозы, ибо ее избыток может вызвать окраску обработанной воды в розовый цвет из-за присутствия растворимого $Mn(VII)$

1.3.2.5. Предварительное окисление озоном (преддозонирование)

При использовании в предварительной обработке исходной поверхностной воды озон, как и ClO_2 , позволяет избежать образования тригалогенметанов и других производных хлора, он не окисляет аммония, но создает благоприятные условия для последующей нитрификации. И хотя в этом плане озон менее эффективен, чем хлор, в настоящее время он наиболее часто применяется в качестве предокислителя в технологических линиях осветления, поскольку дает еще множество положительных эффектов

- повышает эффективность осветления (снижает мутность, цветность, содержание остаточных микроводорослей, ОВ, предшественников тригалогенметанов и др.),
- уменьшает потребность в коагулянтах (в некоторых случаях),
- подготавливает воду для протекания в ней биологических явлений на следующих стадиях обработки

Тем не менее существует достаточно строгая оптимальная доза обработки (около 1 мг/л) и оптимальное время контакта (около 1 мин), при превышении которого хлопья взвеси, напротив, становятся рыхлыми и снова диспергируются.

- При применении преддозонирования в таких условиях требуется учитывать, что
- оно не гарантирует чистоты сооружений из-за отсутствия остаточной концентрации окислителя, что приводит к необходимости укрывать отстойники и фильтры для защиты от солнечного облучения, способствующего биологической активности,
 - технологическая линия обработки сильно загрязненной воды должна включать стадию основного озонирования (с получением остаточного O_3) для того, чтобы обеспечить полное окисление соединений, возможно образовавшихся во время преддозонирования

В целом целесообразность преддозонирования подтверждают примеры обработки коагуляцией на фильтре (см. п. 1.4.2.1) и полной технологической линии осветления с доочисткой (см. п. 1.5.3).

1.4. Осветление

Осветление представляет собой совокупность технологических операций, позволяющих удалить минеральные и органические ВВ из исходной воды, а также часть растворенных ОВ («флокулируемая» фракция)

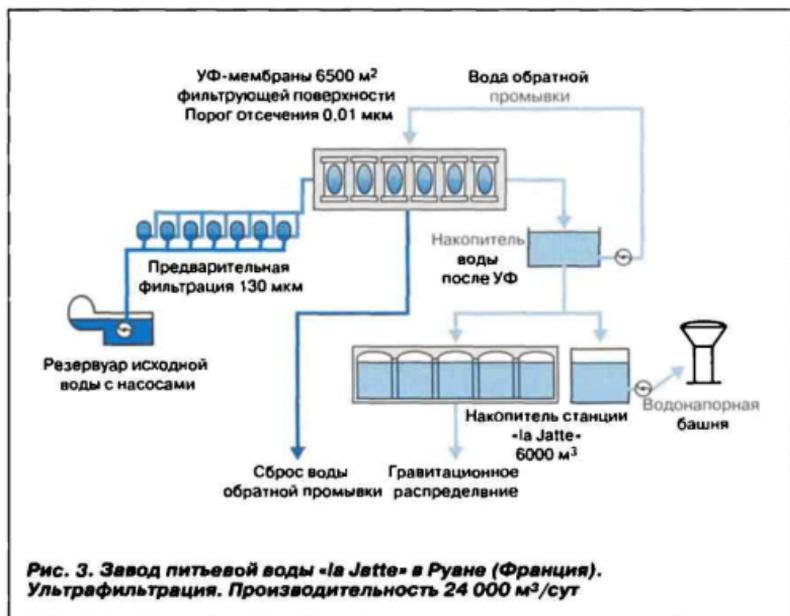
От концентрации тех или иных загрязнений зависит и сложность осуществляемых операций: от простой фильтрации с применением реагентов (или без них) до коагуляции + флокуляции + отстаивания или флотации + фильтрации.

Отталкиваясь от классификации, данной на рис. 2, приведем несколько примеров наиболее показательных решений, имея в виду, что описанные технологические линии могут быть дополнены возможной доочисткой (см п 1 5), которая обязательно должна включать обеззараживание (см п 1 6)

1.4.1. Фильтрация без реагентов

Для воды, которая содержит небольшое количество ВВ неколлоидного характера (случай очень редкий для поверхностных вод), применяется обработка **прямой фильтрацией** без реагентов (см. рис. 2, линия 2), возможно, с предварительным окислением (хлором, озоном). Предварительное хлорирование, как мы убедились, все чаще заменяется предозонированием, и стадия предварительного окисления озоном обычно сочетается с коагуляцией (см. п 1 4 2) Фильтрация без реагентов, впрочем, больше не применяется в странах, где действуют нормы ЕС или Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), кроме особых случаев медленного фильтрования (см. гл. 4, п 6.1)

В настоящее время эффективность мембран приводит к тому, что в обработке воды все чаще применяют **мембраны ультрафильтрации** вместо фильтрации на песке или двухслойной загрузке. Станция питьевой воды в Руане (Франция) производительностью 1000 м³/ч дает этому превосходный пример: на карстовых водах, несмотря на значительные изменения качества [от 1 до 150 NTU (нефелометриче-



ских единиц мутности)), мутность обработанной воды остается постоянно ниже 0,1 NTU, и это без регулировки дозы коагулянта, поскольку нет необходимости в каком бы то ни было реагенте (рис. 3)

Тип установки (фото 2) идеально подходит к карстовым источникам, водам озер и станциям небольшой мощности, так как он позволяет производить воду, постоянно соответствующую самым строгим нормам по мутности и микробиологии, и не требует присутствия высококвалифицированного персонала. Мембранные системы (см. гл. 3, п. 9, и гл. 15, пп. 3.2 и 4.1.1) легко автоматизируются, управляются по показаниям мутномеров и могут автоматически переходить от режима фронтальной фильтрации (мутность нормальная/слабая) к режиму касательной фильтрации (пиковое значение мутности)



Фото 2. Установка ультрафильтрации в Амонкуре (Франция)

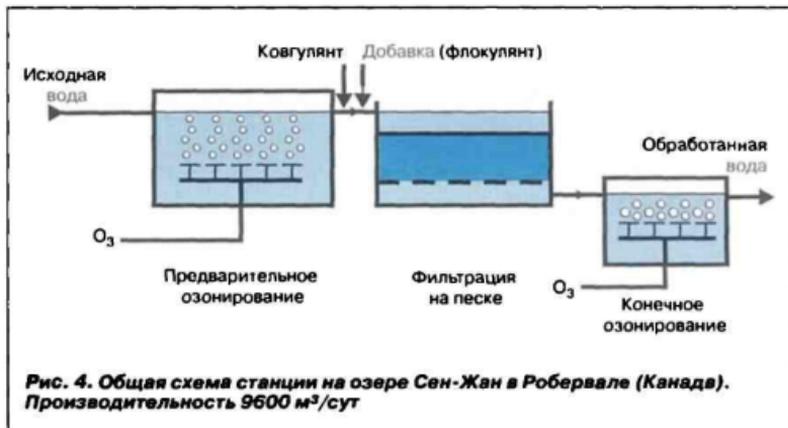
1.4.2. Коагуляция с последующей фильтрацией

Для исходной воды, имеющей небольшую коллоидную мутность и/или цветность и/или содержащей не более 1000–2500 микроводорослей в миллилитре (следовательно, близкой к качеству А1, определяемому французским Декретом 2001-1220), по отношению к предыдущей технологической линии добавляют еще коагуляцию и, возможно, флокуляцию (см. рис. 2, линия 3). Применяемые дозы должны быть небольшими, так как эти реагенты снижают длительность циклов фильтрации между двумя промывками. Введение коагулянта позволяет удалить некоторое количество ОВ. Однако следует обратить внимание на то, что для обработки воды с невысокой мутностью, но с высокой цветностью или загрязненной водорослями такой обработки будет недостаточно; придется применять повышенные дозы коагулянта и, следовательно, предусматривать стадию отстаивания или флотации.

Описанную технологию, внешне простую, можно реализовать разными способами на фильтрах с одним или несколькими слоями

1.4.2.1. Коагуляция на фильтре

Коагуляция на фильтре, называемая также **контактной фильтрацией**, осуществляется достаточно просто: коагулянт вводится в трубопровод (статическое смешивание) без камер коагуляции и флокуляции. В некоторых случаях, особенно если вода холодная, можно добавить быстрый смеситель между введением реагентов и фильтрацией; таким образом, на фильтры поступает скоагулированная вода, но флокуляция заканчивается только в верхнем слое песка.



В качестве примеров можно упомянуть станцию «Assesseg» (Лиссабон), 500 000 м³/сут (см. также п 3.1 2.1, рис. 44), и станцию в Робервале (Канада), 9600 м³/сут, на которой преобладающую роль играет предварительное окисление озонном (рис. 4) В последнем случае предозонирование обеспечивает

- разрушение металлоорганических комплексов, связывающих железо и/или марганец с ОВ,
- окисление этого железа и/или марганца, если концентрация ОВ не слишком высока,
- образование хлопьев, которые могут задерживаться фильтрами

Таблица 2

Гарантийные обязательства компании «Дегремон» для водопроводной станции в Сиднее

Параметры	Качество исходной воды		Гарантии		Среднее количество обработанной воды	Характеристики станции	
	Нормальный уровень	Максимум	Цель	Максимум			
Мутность NTU	0.5	5	< 0.3	0.5	0.06	Песок	Эффективный размер 1.8 мм Высота слоя 2.1 м
Цветность Н	5	20	< 5	10	3.4	Скорость	23-24 м/ч
Железо мг/л		3.5	< 0.2	0.3	0.02	Реагенты	Коагулянт минеральный Коагулянт органический Добавка для фильтрации Кислота или известь pH KMnO ₄ , окисление Fe, Mn
Тригалогенметаны мкг/л			< 100	200	20		



**Фото 3. Завод питьевой воды в Сиднее (Австралия).
Производительность 3 000 000 м³/сут**

1.4.2.2. Флокуляция с последующей фильтрацией

В случае флокуляции с прямой фильтрацией последней предшествуют один или несколько быстрых смесителей (время контакта около минуты) и одно или несколько контактных сооружений, исполняющих функцию либо флокулятора, либо промежуточного реактора, обеспечивающего достаточный интервал времени между введениями реагентов [например, станция в Сиднее, изображенная на фото 3 (см также гл 3, п. 5 4 5 1, и гл. 13, п 3 1)]

Сооружения прямой фильтрации с предварительной флокуляцией особенно рекомендуются для обработки любых вод, температура которых способна опускаться ниже 10 °С, и/или в случаях, когда необходимо вводить многочисленные реагенты

При всем этом оптимизация набора параметров может потребовать длительных испытаний, только после проведения которых можно будет выбрать:

- минеральный и/или органический коагулянт (согласно местному законодательству),
- оптимальное значение pH,
- если требуется, органическую добавку для оптимизации фильтруемости хлопьев;
- эффективный размер фильтрующего материала или набора таких материалов,
- высоту фильтрующего материала или материалов;
- максимальную скорость

Но даже в этом случае обеспечение гарантий по качеству получаемой воды имеет определенную сложность (табл. 2)



**Фото 4. Станция «Alérgiv» (Азорские острова, Португалия).
Производительность 86 000 м³/сут**

1.4.2.3. Двойная фильтрация

В технологической линии двойной фильтрации, как следует из названия, применяются две последовательные стадии фильтрации, в первом фильтре используется материал (песок или **Biolite**) с повышенным эффективным размером частиц, и в нем происходит грубая фильтрация перед вторым фильтром с однослойной тонкой (песок) или с двухслойной загрузкой. Эта технология позволяет обрабатывать без отстаивания (с использованием минимума реагентов) воды, более загрязненные, чем это допустимо для прямой фильтрации в одну стадию. Она применяется на станции «Alérgiv» (фото 4), однако ОВ удаляются хуже, чем в случае полной обработки отстаиванием с последующей фильтрацией.

1.4.2.4. Свойства и пределы применения прямого фильтрования

В табл. 3 приведены максимальные значения скорости фильтрации и удельной задерживающей способности фильтров по ВВ для исходной воды различного качества.

Если максимальные значения загрязненности исходной воды наблюдаются почти постоянно, необходимы предварительные пилотные испытания.

1.4.3. Полное осветление

Технологическая линия с полным осветлением (см. рис. 2, линия 4) должна применяться к воде, показатели мутности, цветности, содержания ВВ, водорослей и окисляемости которой превосходят величины, приведенные в табл. 3, однако без значительных загрязнений (близкой к качеству А2 согласно французскому Декрету 1220 от 2001 г., приложение 1–3).

Таблица 3
Свойства и пределы применения прямой фильтрации

Используемое фильтрование	Песок 0,95 или 1,35 мм	Двухслойный антрацит 1,4–2,6 мм, песок 0,7 мм	Двойная фильтрация
Скорость фильтрации, м ³ /ч	5–15 ¹	5–20 ¹	1,7–20 ¹ 2: 5–15 ¹
Способность задерживания ВВ на единицу фильтрующей поверхности между двумя промывками, кг/м ²	1–6 ¹	2–10 ¹	–
Пределы применения			
– Максимальные значения, наблюдающиеся в исходной воде			
• Мутность, NTU	10–15	15–40	30–100
• ВВ, мг/л	≤ 10	10–25	25–100
• Истинная цветность, мг/л Pt-Co	15–25	25–40	30–50
• Планктонные микроводоросли, ед./мл	1000	2500	5000
• Окисляемость КМnO ₄ , мг O ₂ /л	3–5	3–5	3–5
– Потребность в коагулянте, мг/л кристаллического сульфата алюминия или хлорного железа в 40%-м растворе	10–15	20–25	30–40
¹ Первая цифра относится к случаю, когда одновременно все показатели исходной воды являются неблагоприятными, вторая цифра — когда неблагоприятным является один из рассматриваемых показателей и его максимум наблюдается в течение ограниченного времени			

1.4.3.1. Технологические линии с отстаиванием

Технологические линии с отстаиванием используются уже давно и являются наиболее часто применяемым вариантом. Стадия разделения жидкой и твердой фаз отстаиванием осуществляется после введения реагентов для коагуляции и флокуляции, но перед фильтрацией, чтобы извлечь большую часть образовавшихся хлопьев и обеспечить тем самым нормальное функционирование фильтров

— Если содержание ВВ в исходной воде всегда ниже значения порядка 1–2 г/л (в зависимости от размеров частиц), можно выбрать **контактные отстойники со взвешенным слоем осадка и/или пластинчатые отстойники**, в которые вода поступает после соответствующей предварительной обработки (см. процеживание), как, например, на станции в Алжире производительностью 540 000 м³/сут, содержащей шесть отстойников **Pulsatube** и фильтры **Aquazur V** (фото 5).

— Если содержание ВВ может превышать 2 г/л по меньшей мере в течение нескольких месяцев, то в зависимости от концентрации ВВ применяются разные технологические решения:

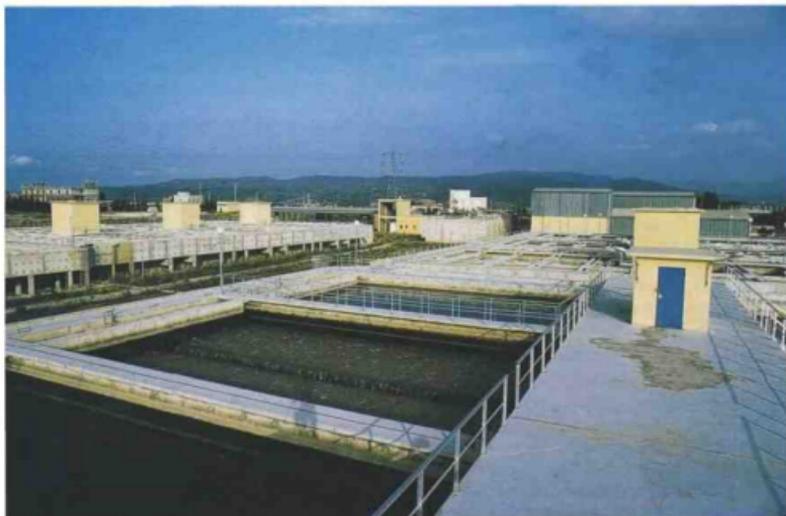
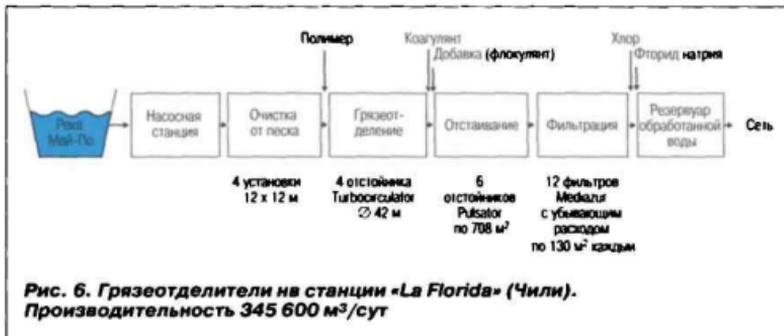


Фото 5. Станция в Будуви (Алжир). Производительность 540 000 м³/сут

- от 2 до 5 г/л в конкретных случаях используют либо статические одноступенчатые отстойники со скребками [скорость между 1 и 2 м/ч, как на станции в Мосуле, Ирак (рис 5)], либо грязеотделитель (см гл. 10, п 3 1), за которым следует отстойник статический, пластинчатый или со взвешенным слоем осадка.
- более 5 г/л: использование только одного отстойника может привести к его забиванию избыточным объемом осадка, и поэтому в данном случае необходимо отстаивание в две ступени, как, например, на станции «La Florida» (Чили), на которой в технологическую линию включена ступень предварительного отстаивания.



Рис. 5. Технологическая линия станции в Мосуле (Ирак). Производительность 207 300 м³/сут



вания в целях грязеотделения (в данном случае на установке **Turbocirculator**), а затем ступень основного отстаивания на установке **Pulsator** со взвешенным слоем осадка (рис. 6 и фото 6)

Однако и в этом случае имеется верхний предел содержания ВВ, при превышении которого потребность в реагентах становится слишком высокой и объем образовавшегося осадка слишком большим для того, чтобы его можно было удалить и получить достаточный расход осветленной воды. Обычно весьма трудно обеспечить работу станции при содержании ВВ в исходной воде более 40–50 г/л (а в некоторых водах может быть пиковое содержание ВВ до 200 г/л). В этом случае надо тщатель-

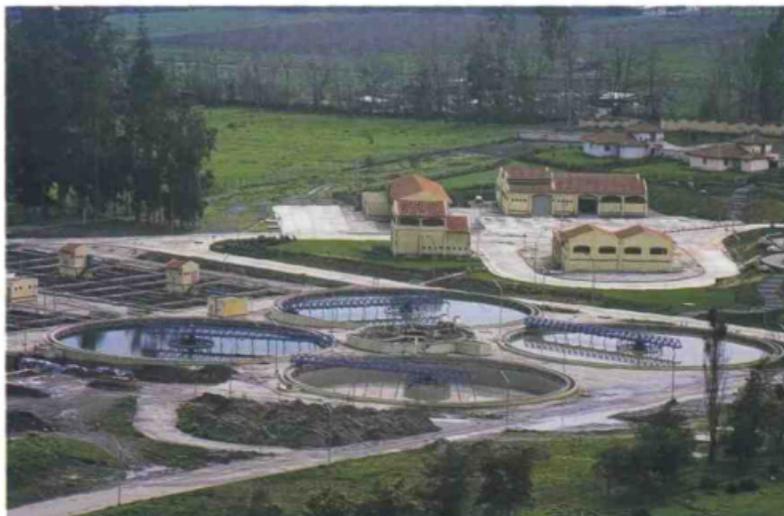


Фото 6. Грязеотделители на станции «La Florida» (Чили). Производительность 345 600 м³/сут

Таблица 4

Сводная таблица способов осветления (если присутствие водорослей и цветность незначительны) в технологических линиях обработки питьевой воды

Максимальное содержание ВВ

↓	Технология	Реагенты	
		1-я ступень	2-я ступень
100 г/л	Отстаивание в две ступени 1. Грязеотделитель ¹ Статический отстойник со скребками	Анионный полимер	Минеральный коагулянт (+ флокулянт) и/или органической (катионный) ²
30 г/л	Отстаивание в две ступени 1 Грязеотделитель ¹ 2 Контактный отстойник со слоем осадка и/или пластинчатый отстойник		
10 г/л	Статический отстойник со скребками ¹ или грязеотделитель ¹ + контактный отстойник со слоем осадка и/или пластинчатый отстойник	Катионный полимер ²	Минеральный коагулянт (+ флокулянт при необходимости)
5 г/л	(Возможно двухслойное отстаивание)	Минеральный коагулянт или органической (катионный) ²	
1 г/л	Отстаивание в одну ступень в отстойнике со взвешенным слоем осадка (Pulsator ³ , Pulsatube ³ , Superpulsator ³ , Densadeg, Accelator, Turbocirculator, Sedipac FD)	Минеральный коагулянт [соли Al(III), Fe(III)] и/или органической коагулянт ² (катионный полимер) + флокулянт (полиэлектролит анионный или неионный, альгинат, активный кремнезем)	
100 мг/л	Коагуляция на двухслойном фильтре или двойная фильтрация ⁴		
10 мг/л	Коагуляция на песчаном фильтре		

¹ При значительной концентрации взвешенных частиц размером 150 мкм песколовка размещается перед грязеотделителем

² Когда такой продукт разрешен для применения

³ В случае присутствия песка используется песколовка, задерживающая частицы размером более 100 мкм

⁴ В некоторых условиях при концентрации ВВ до 100 мг/л применима двойная фильтрация

но оценить количество осадка для удаления и определить соответственно расход исходной воды, необходимый для получения нужного количества обработанной воды в самом деле концентрация осадка, полученного из очень загрязненных вод, меняется по меньшей мере от 100 до более 400 г/л в зависимости от природы ВВ и примененной обработки. В случае необходимости, в периоды очень сильного загрязнения воды, можно использовать сделанный заранее запас исходной воды выше по течению реки от места расположения станции.

Грязеотделитель (см. типы аппаратов в гл. 10, п. 3.1) работает при гидравлической нагрузке в диапазоне $1,5\text{--}10\text{ м}^3/(\text{ч}\cdot\text{м}^2)$ в зависимости от содержания ВВ и применяемой химической обработки. Чтобы такой аппарат был эффективным, его нельзя использовать как установку для удаления песка, если в исходной воде песок имеется в значительных количествах, то, чтобы не повредить скребковую систему грязеотделителя, перед ним нужно расположить песколовку (см. гл. 9, п. 2.2.1), удаляющую частицы песка размером от 0,15 до 0,3 мм.

Если станция включает две ступени отстаивания, имеет смысл использовать технологию **двойной флокуляции** (введение реагентов перед каждым отстаиванием), что позволяет получить экономию, иногда весьма значительную. Двойная флокуляция должна производиться по правилам, адаптированным к каждому конкретному случаю в зависимости от природы и максимального расчетного содержания ВВ.



Фото 7. Флотационная станция.
Производительность $105\ 000\text{ м}^3/\text{сут}$
(Понтстисилл, Великобритания)

— в менее загрязненной воде это может быть простое **разделение дозы минерального коагулянта** между предварительной и основной ступенями отстаивания;

— в воде, содержащей ВВ с концентрацией примерно **5 г/л**, лучшего результата часто добиваются применением **катионного полиэлектrolита** в грязеотделителе. Например, на станции в Коста-Рике, где концентрация ВВ в исходной воде быстро изменяется от 50 мг/л до 5 г/л, постоянное введение $1,5\text{ г}/\text{м}^3$ такого полимера в грязеотделитель, функционирующий со скоростью $3,5\text{ м}/\text{ч}$, позволяет получить достаточно стабильное качество предварительно отстоянной воды и поддерживать в отстойнике **Pulsator** на стадии основного осветления уровень доз обработки сульфатом алюминия в диапазоне $30\text{--}40\text{ г}/\text{м}^3$.



— при большем содержании ВВ (10 г/л и выше) в первую очередь применяют анионный полимер, а грязеотделитель должен рассчитываться как сгуститель осадка.

В любом случае целью первой стадии обработки не является получение воды совершенного качества. в самом деле отстойник, который размещается на следующей стадии, часто более эффективен в обработке среднезагрязненной воды (200–500 мг/л), чем воды с низким содержанием ВВ (< 50 мг/л).

В табл 4 сведены критерии выбора, которыми можно руководствоваться при проектировании многостадийных технологических линий осветления в зависимости от концентрации ВВ в исходной воде

1.4.3.2. Применение флотации

В 60-е гг флотация развивалась в Скандинавии для обеспечения городов питьевой водой и производственного водоснабжения некоторых отраслей промышленности (особенно целлюлозно-бумажной) с использованием воды озер, в основном холодной, с высокой цветностью, но малой мутностью.

Начиная с 70-х гг. флотация стала применяться и во многих других странах (Англии, Бельгии, Франции, Южной Африке и др.) для обработки поверхностных вод с небольшим содержанием глины, но со значительным содержанием водорослей, гуминовых кислот и других ОВ и с высокой цветностью (см. фото 7 и рис. 7)

Технология флотации отличается.

- высокими скоростями разделения твердой и жидкой фаз (от 7 до 35 м/ч в зависимости от принятой технологии — см. гл 10, п 4);
- большой гибкостью в работе (простота остановки и повторного запуска);
- использованием минимального количества флокулянта.

Таким образом, предпочтительная область применения данной технологии — обработка вод, которые характеризуются регулярным содержанием водорослей более 2500 ед./мл и/или цветностью более 40 мг/л Pt-Co, никогда не имеют мутность выше 40 NTU или содержание ВВ выше 25–30 мг/л (если только значения выше указанных не достигаются в течение достаточно длительного периода времени и нет возможности легкой очистки дна флотатора).

Однако следует помнить, что

- напорная флотация потребляет больше энергии, чем отстаивание ($40\text{--}80 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$ воды против менее $10 \text{ Вт} \cdot \text{ч}/\text{м}^3$ для большей части отстойников);
- этот процесс не допускает механических остановок цикла насыщения воды воздухом

1.4.3.3. Резюме по технологиям осветления

В показанной на рис. 8 диаграмме предлагаются показатели для выбора технологической линии осветления в зависимости от мутности, содержания ВВ, цветности и содержания планктонных микроводорослей

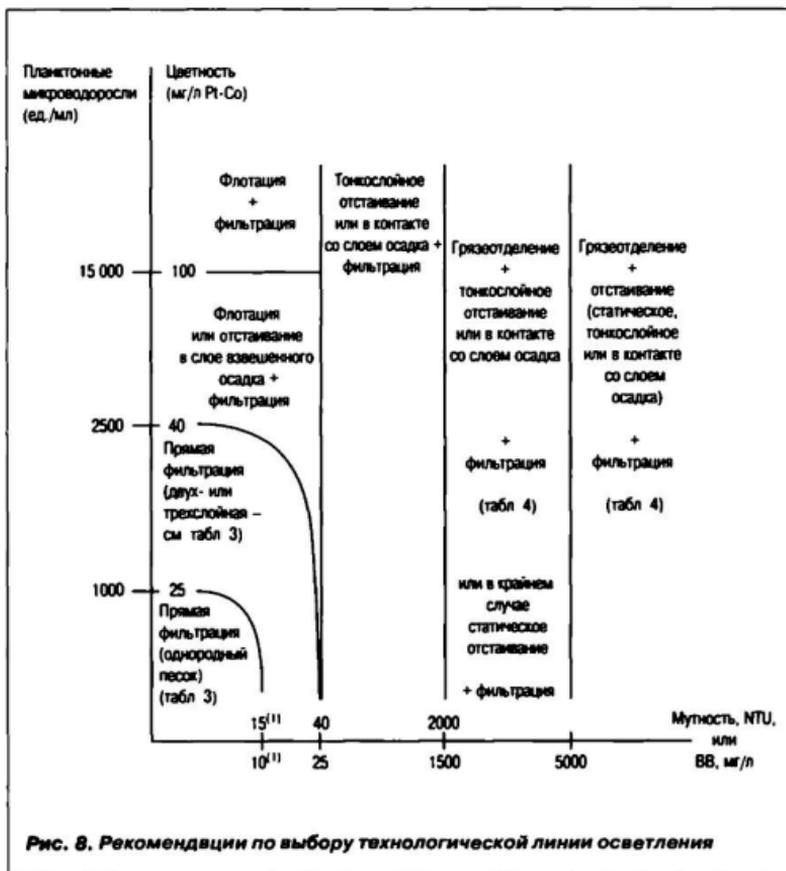


Рис. 8. Рекомендации по выбору технологической линии осветления

1.5. Доочистка: удаление органических веществ и микрозагрязнений

1.5.1. Общие положения

После того как в течение долгого времени осветление было единственной обработкой поверхностных вод, оно все чаще становится лишь предварительной стадией во все более усложняющейся технологической линии обработки в связи

- с урбанизацией и все более интенсивным индустриальным и сельскохозяйственным развитием, что приводит к постоянному ухудшению качества исходной воды (детергенты, пестициды, нитраты и др.),
- с более совершенными методами анализа вод, которые позволили выявить загрязнения, до того неизвестные (тригалогенметаны, броматы, полихлорбифенилы и др.),
- с нормами, определяющими качество воды не только на выходе с водопроводных станций, но и из крана потребителя, что предполагает производство воды с большой физико-химической и биологической «стабильностью» (без изменения в сети распределения)

Следовательно, именно такое интегрированное видение целостности системы «производство и распределение» разработчик и пользователь должны принимать во внимание, учитывая, что

- сеть распределения является потенциальным биологическим и/или физико-химическим реактором, и поэтому поддержание качества произведенной воды от станции до крана потребителя обеспечивается только в том случае, если соответствующие реакции завершены на станции водоподготовки (удаление органического биоразлагаемого углерода, аммония, соблюдение кальций-углеродного равновесия и др.),
- стадия доочистки оказывается в связи с этим весьма важной, но ее применение наиболее эффективно только после оптимального осветления, именно в этих условиях можно максимально уменьшить риск появления нежелательных побочных продуктов (тригалогенметанов, галогенуксусной кислоты и др.) во время фазы окисления или заключительного обеззараживания.

Вышеуказанные соображения приводят к необходимости более тщательного удаления в первую очередь ОВ. На практике это выражается прежде всего в **оптимизации условий проведения осветления** (дозы коагулянта, величины рН флокуляции, предозонирования, использования ПАУ и др.), но также и во введении **дополнительной фильтрации** на специальных материалах (например, ГАУ, Biolite), чтобы одновременно с физической фильтрацией проводить **биофильтрацию** и/или **адсорбцию**, позволяющие эффективно удалять растворимые формы углеродных и азотных загрязнений

В настоящее время необходимо уже на стадии осветления обеспечивать максимально эффективное удаление патогенных организмов и, прежде всего, простейших паразитов, таких как *Giardia* и *Cryptosporidium*, вследствие чего все чаще ставится цель довести мутность до значения 0,1 NTU. Это приводит к **концепции «мультибарьерной» обработки**, в которой сочетаются процессы разделения твердой и жидкой фаз в отношении взвешенных частиц, удаление растворимых загрязнений в процессе доочистки и обеззараживание физическим или химическим способом.

1.5.2. «Инструменты» доочистки

Для удаления растворенных загрязнений (ОВ, микрозагрязнений), как и при осветлении, прибегают к различным средствам, которые обработчик воды может успешно использовать вместе или по отдельности, но чаще всего на нескольких последовательных стадиях (см. рис. 2, линии 5, 6 и 7).

К основным применяемым средствам относят:

- химическое окисление,
- адсорбцию,
- биологические процессы

1.5.2.1. Химическое окисление

Химическое окисление (см. также гл. 3, п. 12, и гл. 17) предполагает главным образом окисление **озоном** на стадии доочистки. В процессе окисления молекулы с большой молекулярной массой **трансформируются** в молекулы меньших размеров. Особое внимание должно уделяться характеристикам **образующихся побочных продуктов**, ибо они могут быть так же нежелательны, как и исходные вещества. Именно так обстоит дело, в частности, с пестицидами типа триазинов (атразин, симазин), цикл которых, сформированный тремя атомами азота, не разрывается обычным окислением (озон, озон плюс перекись водорода), но оно приводит к образованию из атразина, например, дезэтил- или дезизопропилатразина, чем и вызвано запрещение процесса **Perozone** ($O_3 + H_2O_2$) во Франции для обработки воды, содержащей пестициды.

Однако следует отметить эффективность применения озона в отношении органических молекул, содержащих двойные связи (хлорированные растворители, такие как трихлорэтилен, тетрахлорэтилен) или ароматические циклы (фенолы, некоторые природные органические соединения), которые преобразуются в молекулы более легко биоразлагаемые; если за таким озонированием следует биологическая фильтрация, то удается извлечь большую часть **предшественников тригалогенметанов**. Кроме того, озон значительно улучшает **вкус и запах** воды. При этом надо отметить, что если примененная при обработке доза озона слишком мала, разложение некоторых ОВ приводит к образованию соединений, способных придавать воде привкус (кетоны, альдегиды). В этом случае, чтобы получить воду хорошего качества, важно увеличить дозу озона и/или время контакта.

Доза озона для обработки конкретной воды должна определяться по результатам лабораторных тестов (см. гл. 5, п. 4.1.4).

1.5.2.2. Адсорбция

Адсорбция реализуется с использованием активированного угля в гранулах или в порошке, реже — смол, которые характеризуются очень большой удельной поверхностью (пористостью) и наличием активных мест, которые фиксируют растворенные молекулы, удаляя их таким образом из обрабатываемой среды.

Физико-химическое явление адсорбции на ПАУ или ГАУ и принципы его использования описаны в гл. 3, п. 10, на фильтре с ГАУ часто возникают биологические процессы, прежде всего после стадии озонирования (см. понятие «биологически активный уголь» в гл. 4, п. 6.3). Технология фильтрации на ГАУ (**Carbazur**) рассматривается в гл. 13, п. 3.3.

В технологической линии обработки ПАУ вводится обычно перед отстойниками, взвешенные слои осадка отстойника **Pulsator** или его пластинчатый модифицированный вариант для действия угля.

Фильтры с ГАУ могут быть установлены

— либо вместо фильтров с песком «фильтрация на ГАУ на первой ступени» (одновременное осветление и доочистка), эффективный размер частиц материала в этом случае составляет примерно 1 мм. Такой вариант размещения применяется обычно для особых случаев реконструкции старых станций, на которых трудно построить другие сооружения фильтрации. ГАУ заменяет существующий песок, но тогда к этой новой ситуации следует адаптировать промывку фильтров,

— либо после быстрой фильтрации на песчаных скорых фильтрах и, если возможно, озонирования «фильтрация на ГАУ на второй ступени» (применение ГАУ на стадии доочистки обеспечивает большую эффективность и увеличивает продолжительность жизни угля); эффективный размер частиц ГАУ в этом случае равен примерно 0,75 мм

Эффективность адсорбента выражается его емкостью (масса микрозагрязнителя, задерживаемая единицей массы адсорбента), однако наблюдают очень **большое расхождение** между данными, полученными в результате лабораторных опытов с использованием дистиллированной воды и на практике, когда микрозагрязнитель сосуществует в исходной воде со сложным органическим составом

Из-за большой разницы, которую можно наблюдать между концентрациями и молярными массами различных загрязнителей (природные органические соединения, пестициды, молекулы, дающие привкус, и др.), надо учитывать, с одной стороны, кинетику адсорбции, с другой стороны, явления конкуренции. Это приводит обработчиков воды к разделению операций — возможно более полное извлечение растворенного органического углерода коагуляцией в кислой среде и адсорбцией на гидроксиде металла (хлопья) и последующая фиксация остаточных молекул на ПАУ или ГАУ

Продолжительность жизни ГАУ зависит от параметров функционирования и, прежде всего, от адсорбируемых веществ. Малополярные продукты хорошо адсорбируются. Макромолекулы больших размеров имеют тенденцию забивать поры и сокращать полезную поверхность гранул, в результате уменьшается продолжительность жизни ГАУ. Структура угля также имеет значение — уголь с порами малых размеров (типа кокосового ореха) быстро насыщается, даже если его емкость, измеренная в лаборатории с малыми молекулами (например, йодный индекс), велика.

На практике при режиме работы 4–6 объемов воды в час на 1 объем ГАУ «продолжительность жизни» (промежуток времени между двумя регенерациями угля) существенно зависит, например, от принятого в расчет времени его эффективного действия:

- 3–6 мес в отношении природных органических соединений, если необходимо гарантировать более 15 % их удаления;
- 12–18 мес в отношении пестицидов;
- 3–4 года в отношении привкусов и запахов

В процессе работы фильтра слой ГАУ должен периодически промываться в целях удаления ВВ и бактерий (и даже микроскопических животных, таких как ротиферы, нематоды, олигохеты и др.), которые иначе могут накапливаться между гранулами (фильтр первой ступени — одна промывка каждые 24–48 ч, фильтр второй ступени — одна промывка каждые 1–2 нед)

1.5.2.3. Биологические процессы

Биологические процессы, протекающие на фильтрующих материалах (см гл. 4, п. 6), превращают нежелательные молекулы или ионы в побочные продукты, обычно не влияющие на качество воды. Так обстоит дело с солями аммония (NH_4^+), которые превращаются в нитраты (NO_3^-), с нитратами, которые восстанавливаются в некоторых случаях до азота (N_2), с биоразлагаемым растворенным органическим

углеродом (БРОУ), который участвует в метаболизме гетеротрофных бактерий на поверхности биологически активного угля.

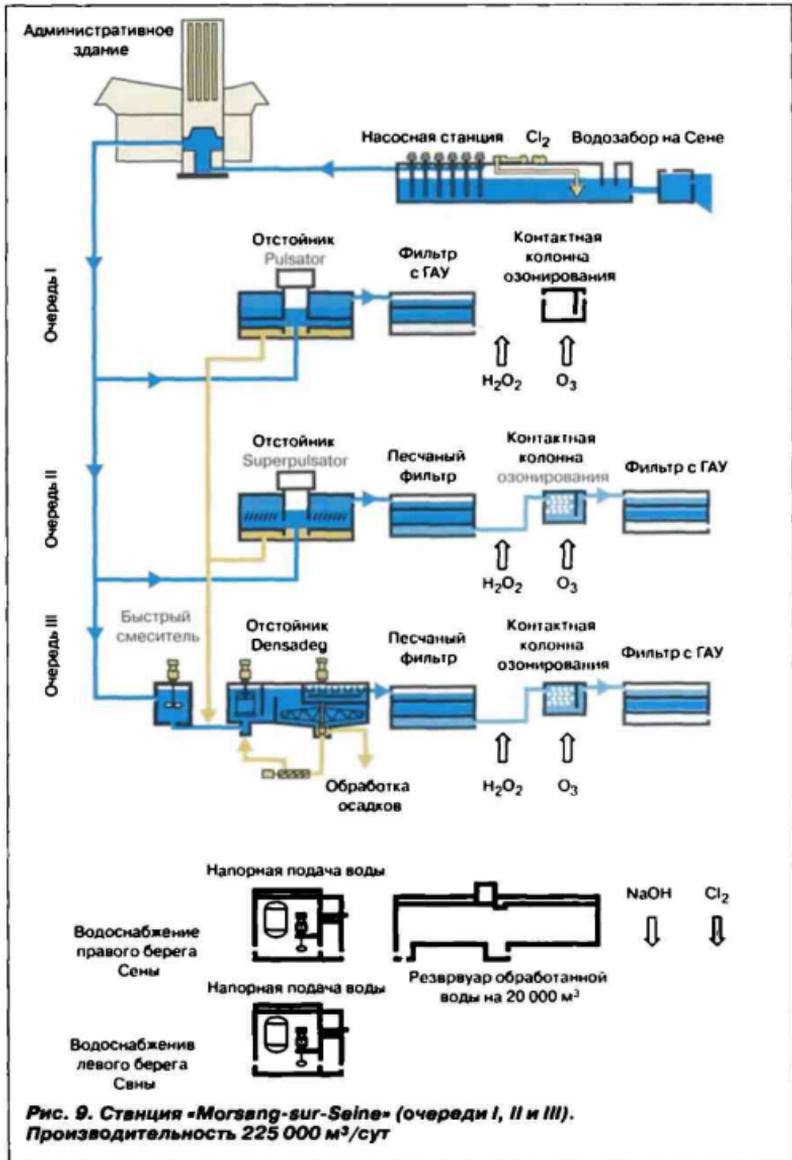
Каждая обработка требует специфических условий по величине pH, окислительно-восстановительному потенциалу, растворенному кислороду, температуре, времени контакта, так же как и по материалу-носителю бактерий (см гл 4, п 6) Биологически активный уголь (см. ниже), в частности, осуществляет двойное действие адсорбцию и биологическое удаление БРОУ, иногда также описываемое как адсорбция с последующей биологической регенерацией угля

1.5.3. Примеры применения

В технологические линии, обычно используемые в производстве питьевой воды из загрязненных поверхностных вод, достаточно часто включают стадию биологического разложения углерода на фильтрах с активированным углем, этой стадии обычно предшествует «контролируемое озонирование» (см гл 4, п 6 3) Это очень важно, так как при этом необходимо не допустить образования нежелательных побочных продуктов (например, броматов) благодаря регулированию величины pH, времени контакта и уровня остаточного окислителя, всесторонне способствуя работе биологического реактора, размещаемого на следующей стадии обработки (насыщение кислородом, обеззараживание, предотвращающее размножение патогенных микроорганизмов, улучшение биоразлагаемости)



Фото 8. Станция «Morsang-sur-Seine». Производительность 225 000 м³/сут





**Фото 9. Станция в Графхеме (Великобритания).
Производительность 360 000 м³/сут**

I, II и III очереди станции «Morsang-sur-Seine» (фото 8 и рис 9) демонстрируют эволюцию рассматриваемого типа технологической линии, на I очереди станции озон использовался только как простой дезинфектант и представлял собой последний этап обработки, чтобы противостоять ухудшению качества воды в источнике и удовлетворить более жестким требованиям по стабильности обработанной воды в сетях распределения, на очередях II и III станции после озонирования была добавлена стадия фильтрации на ГАУ

В этом же контексте можно упомянуть многочисленные заводы питьевой воды, построенные в 60–70-х гг и впоследствии модернизированные (как, например, во Франции в Лиможе, Метце, Орли и др.), так же как и построенные позднее заводы, качество обработанной воды на которых должно было удовлетворять еще более строгим требованиям, например в Кота-Тинги, Малайзия (см гл 10, п 3 3.2 1, фото 12). — требование по снижению мутности до < 0,1 NTU, в Графхеме, Великобритания (фото 9), — необходимость гарантированной очистки от пестицидов На большинстве этих станций с доочисткой озоном и ГАУ выполняется также предозонирование перед осветлением

На рис. 10 показана технологическая линия станции «Mont Valérien» (1985), расположенная возле Парижа и снабжаемой исходной водой из реки Сены Это одна из первых реализаций, теперь же такие технологические линии являются типичными для обработки загрязненных вод (помимо мембранной обработки) На II очереди (1995) станции «Mont Valérien» была воспроизведена та же самая технологическая линия, но дополнительно в нее включили отстаивание в установке **Densadeg** (ввиду ограниченности площади) и вместо и на месте песчаных фильтров использовали нитрификацию на загрузке из материала **Biolite** (см п 2 3 2 3) Несмотря на высокую загрязненность исходной воды (р. Сена ниже Парижа), результаты получились замечательными (см. табл 5)



Таблица 5

Завод питьевой воды «Eau & Force du Mont Valérien» (Верхняя Сена, Франция). Итоговые результаты работы за 2000–2003 гг.

Параметры	Исходная вода		Обработанная вода		Норма	
	Среднее	Максимум	Среднее	Максимум		
Мутность, NTU	20	> 100	0,13	0,3	0,5	
Аммоний, мг/л	0,22	0,8	< 0,1	< 0,1	0,1	
Нитраты, мг/л	23	28	25	30	50	
ООУ, мг/л	4,0	> 10	1,4	1,7	–	
Пестициды, мкг/л	Агразин	0,11	0,65	0,02	0,08	0,1
	Всего	0,13	0,65	0,02	0,08	0,5

1.6. Обеззараживание

1.6.1. Определение

Обеззараживанием называется последний этап обработки питьевой воды перед ее распределением. Оно позволяет удалить из воды патогенные микроорганизмы. Между тем в воде могут выжить некоторые обыкновенные организмы, так как обез-

зараживание не является стерилизацией (стерилизация означает разрушение **всех** микробов, присутствующих в обрабатываемой среде) (см гл 3, п. 12, и гл 17).

1.6.2. Бактерицидное и остаточное действие

Обеззараживание воды включает две важные стадии, соответствующие двум различным действиям конкретного дезинфектанта.

— **бактерицидное действие**, т. е. способность разрушать микробы на данной стадии обработки.

— **остаточное действие**, т. е. действие дезинфицирующего вещества, сохраняющегося в воде, в частности в распределительных сетях и позволяющее гарантировать бактериологическое качество воды вплоть до крана потребителя; это одновременно бактериостатическое действие по предотвращению оживления бактерий и бактерицидное действие против отдельных слабых и разовых загрязнений, появляющихся в сети, так же как и предотвращение развития микробес-позвоночных, устойчивые или репродуктивные формы которых могли бы пройти через станцию водоподготовки

Таблица 6
Применяемые дезинфицирующие средства

Действие	O ₃	Cl ₂	ClO ₂	Хлорамины	Ультрафиолетовое облучение
Бактерицидное + антивирусное	+++	++	++	+	++
Цисты простейших	+	0	0	0	+++
Остаточное	0	+	++	+++	0

В табл. 6 приведены сравнительные данные по эффективности всех применяющихся дезинфицирующих средств (см гл 3, п. 12)

1.6.3. Общие условия хорошего обеззараживания

Чтобы быть эффективным, обеззараживание должно проводиться на воде хорошего качества. Содержание **ВВ** должно быть максимально **уменьшено** и быть не более 1 мг/л. Действительно, бактерии и особенно вирусы связываются с частицами **ВВ**, которые ослабляют действие дезинфицирующих веществ.

Содержание **ОВ**, **ОУ** и, прежде всего, **усваиваемого органического углерода** или **БРОУ** должно также быть **как можно более низким**, иначе вода будет потреб-лять больше дезинфектанта, что

- повлечет передозировку этого реагента,
- сделает трудным поддержание остаточного количества его в сети распределения без добавления в различных ее точках,
- приведет к оживлению бактерий в сети распределения,
- вызовет появление вредных побочных продуктов.

Однако попытки уменьшения образования тригалогенметанов не должны быть в ущерб эффективности самого обеззараживания

1.6.4. Условия применения различных реагентов

Как было показано в гл. 3, п. 12.3, успешное обеззараживание с помощью реагентов-окислителей требует согласования величин остаточной концентрации C с временем контакта T (параметр CT):

$$C, \text{ мг/л} \cdot T, \text{ мин} = CT, \text{ мг} \cdot \text{мин/л}$$

Величина CT изменяется в зависимости от природы микроорганизмов, типа дезинфицирующего вещества и температуры. В качестве примера на рис. 11 продемонстрированы условия удаления 99,9 % (3lg) популяции *Escherichia coli*, в общем плане более подробно об этом см. в гл. 17, пп. 2, 3, 4 и 6, где уточнены условия применения и эффективность действия различных дезинфицирующих средств, включая ультрафиолетовое излучение (УФИ), в зависимости от условий их использования (параметр CT , температура, величина pH, доза) и микроорганизмов, на которые нацелено обеззараживание.

Для сведения можно привести следующие правила

■ Хлор

Поддержание концентрации свободного хлора на уровне 0,5 мг/л в течение времени контакта 30 мин ($CT = 15$) при значении pH ниже 8 позволяет уничтожить патогенные бактерии и вирус полиомиелита, но при этом есть риск появления привкуса и тригалогенметанов в сети распределения при наличии в воде ООУ.

■ Диоксид хлора

Поддержание концентрации 0,2 мг/л в течение 15 мин ($CT = 3$) обеспечивает эффективную защиту. Важно остаточное действие этого реагента, но нежелательно и даже запрещено в некоторых странах, например во Франции, использовать слишком большие дозы ClO_2 для обеззараживания. Окисляющее действие ClO_2 на ОВ высвобождает ион ClO_2^- , который признан токсичным и придает воде неприятный металлический привкус.

■ Озон

Поддержание концентрации 0,4 мг/л в течение 4 мин ($CT = 1,6$) рекомендовано для удаления патогенных бактерий и полиовирусов. При 5 °C необходимо, чтобы фактор CT был равен 2 для обеспечения удаления цист *Gardia* и более 15 — для ооцист *Cryptosporidium*. При этом следует обязательно убедиться, что использование такой обработки не повлечет образования нежелательных побочных продуктов



окисления, особенно броматов (BrO_3), которые считаются опасными при значениях 10 мкг/л. Действительно, такие наблюдения лежат в основе уже упоминавшейся «мультибарьерной» концепции обработки химическое обеззараживание против бактерий и вирусов с применением обычных критериев, тогда как удаление цист базируется, прежде всего, на эффективности фильтрации (с использованием мелкогранулированных материалов или, еще лучше, мембран осветления) и, кроме того, на использовании ультрафиолетового излучения.

Обеззараживание озоном требует, чтобы подлежащая обработке вода не содержала растворенного марганца Mn^{2+} , иначе она может окраситься в розовый цвет. Этот цвет затем становится коричневым вследствие осаждения MnO_2 .

Учитывая изложенное выше, пришли к согласию о том, что не следует использовать озон в целях обеззараживания на последней стадии обработки воды после него необходимо предусмотреть фильтрацию через ГАУ в целях снижения содержания БРОУ, чтобы ограничить риск оживления (микроорганизмов) в сетях распределения и снизить предохранительное хлорирование.

■ Хлорамины

Хлорамины практически не используются в качестве бактерицидного средства (слишком слабого), но применяются как «бактериостатики» в сетях распределения благодаря постоянству их остаточного действия, особенно для относительно теплой воды (25 °C или выше), поскольку при этой температуре они более стабильны, чем свободный хлор. В странах, где приемлема доставка потребителю воды с высоким содержанием остаточных обеззараживающих веществ, хлорамины применяются после обеззараживания, осуществленного либо озоном, либо хлором (для бактерицидного действия).

■ Ультрафиолетовое излучение

Действие ультрафиолетовых лучей описано в гл. 17, п. 6, там же приведены рекомендованные дозы в зависимости от прозрачности обрабатываемой воды, вида микроорганизмов и требуемого уровня их удаления.

В обеззараживании питьевой воды, ввиду очень высокой прозрачности (> 90 % на м) воды с мутностью < 1 NTU, рекомендуются дозы от 20 до 40 мВт · с/см² и предлагается применение систем с УФ-лампами среднего давления (малое число ламп — малые габариты и др.), что показано в табл. 7.

Условия реализации

Геометрия и, следовательно, гидравлика аппаратов для обеззараживания имеют важное значение. В настоящее время эффективность контактных камер может быть оценена компьютерным моделированием потоков (см., например, гл. 17, п. 6.4), которое учитывает гидравлику системы (и, следовательно, время прохождения воды через зону влияния ламп-генераторов УФ), мощность пучка, а также его ослабление в результате абсорбции водой и растворенными веществами.

Таблица 7

Организмы	<i>Escherichia coli</i>	<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Споры <i>Bacillus subtilis</i>	<i>Giardia</i> , <i>Cryptosporidium</i>
Доза для подавления 99,9 %, мВт · с/см ²	10	10	20	20–40

Хорошее удаление железа и цветности воды необходимо как для обеспечения ее высокой прозрачности, так и для того, чтобы избежать значительного загрязнения кварцевых оболочек, которые защищают лампы

Учитывая достаточно сильное выделение тепла, нужно следить за тем, чтобы вода не была слишком агрессивной и не произошло быстрое отложение накипи на защитных оболочках.

В любом случае реактор обеззараживания должен быть снабжен системой автоматической очистки этих оболочек

Преимущества и недостатки

Ультрафиолетовое излучение — единственное дезинфицирующее средство, не образующее вредных побочных продуктов и эффективное против всех микроорганизмов, включая цисты простейших, — имеет два недостатка:

— не существует возможности проверить эффективность используемой дозы облучения измерением остаточной концентрации, как в случае применения химических окислителей; следовательно, необходимо, чтобы реактор был снабжен УФ-датчиками (если возможно, по одному датчику на лампу), позволяющими непрерывно контролировать реально испускаемое лампами излучение для того, чтобы:

- следить за нормальным старением ламп (компенсируемым увеличением тока питания);
- быстро определять возможную неисправность любой из ламп, чтобы автоматически привести в действие резервный реактор или тут же заменить неисправную лампу (в течение нескольких минут остановки).

— при отсутствии остаточного действия, если только сеть не является короткой и хорошо содержится, УФ-излучение должно сочетаться с введением другого дезинфицирующего реагента с хорошим остаточным действием (Cl_2 , ClO_2 , хлорамин). Таким образом, УФ-реактор (см фото аппаратов типа **Aquaray** в гл 17, п 6) должен применяться после доочистки, но перед введением какого-либо последнего дезинфицирующего вещества

1.7. Мембранные технологии

Мы уже говорили о значении мембран ультрафильтрации при осветлении карстовых вод (см п 1.4.1). Однако в условиях все более ужесточающихся требований по качеству питьевой воды операторы соответствующих сооружений естественно склоняются к применению этих мембран и в более сложных технологических линиях.

1.7.1. Нанофильтрация

Как было показано в гл 3, п 9, рис 83, только мембраны обратного осмоса, вариантом которых является нанофильтрация, способны удалить все загрязнения, потенциально присутствующие в поверхностной воде. Таким образом, они могут рассматриваться как «абсолютное оружие» обработки воды в производстве питьевой воды, но фактически даже в настоящее время на применение нанофильтрации накладываются некоторые ограничения

- требуется очень тщательная предварительная обработка (обеспечение индекса забления мембран меньше 3 — см. гл. 3, п 9, и гл 15).
- происходит частичное обессоливание и умягчение, которое может быть благоприятным, но может оказаться слишком глубоким и вызвать необходимость

либо в последующей remineralization, либо в смешивании с исходной водой, что, естественно, ухудшает результаты по всем другим параметрам.

- требуется повышенное рабочее давление (6–10 бар), что увеличивает стоимость энергии;

- имеют место повышенные потери воды (коэффициент выхода фильтрата часто ограничен 80–85 %, потери 15–20 %)

Все это делает разумным ее использование лишь в определенных случаях обработки, например.

- солоноватых вод, очень жестких и иногда окрашенных, как флоридские водоносные горизонты (на сегодняшний день действуют сооружения с мембранной нанофильтрацией производительностью более 300 000 м³/сут),

- вод мало минерализованных, но с очень сильной цветностью, которые предварительно необходимо подвергнуть remineralization, чтобы снизить их высокую коррозионную активность

Заметим, что то, что возможно в нанофильтрации, тем более допустимо в обратном осмосе низкого давления, при этом существенным различием между двумя процессами является требуемая степень задержания солей моновалентных ионов. Вполне возможно представить варианты, в которых осуществляется смешанная обработка x % потока обратным осмосом и $(100 - x)$ % потока нанофильтрацией или даже x % обратным осмосом или нанофильтрацией и $(100 - x)$ % ультрафильтрацией, что позволяет оптимизировать удаление различных солей и ОВ, сохраняя при этом абсолютный барьер для микроорганизмов любых типов

1.7.2. Способ Cristal

В способе **Cristal** (рис. 12) сочетаются две ранее рассмотренные технологии, а именно

- фиксация растворенных загрязнений на нерастворимом адсорбенте (ПАУ, смолы),

- обработка на мембране ультрафильтрации (УФ-мембране).

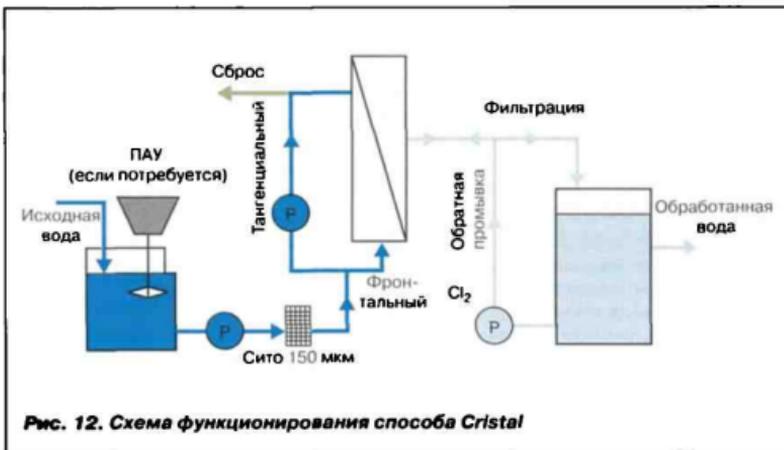


Рис. 12. Схема функционирования способа Cristal



**Фото 10. Станция в Лозанне (Швейцария).
Производительность 70 000 м³/сут**

Контур ультраfiltrации может выполнять роль реактора адсорбции, так как мембрана задерживает как ВВ, присутствующие в исходной воде, так и адсорбент, зафиксировавший растворенные загрязнения, и все нежелательные микроорганизмы: цисты, бактерии, вирусы, что позволяет распределять обработанную таким способом воду с минимумом остаточного обеззараживающего вещества.

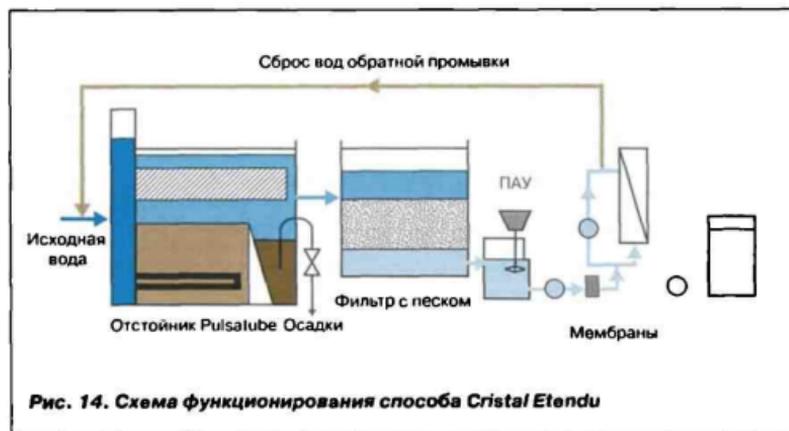
Среди станций питьевой воды, работающих на основе способа **Cristal**, можно назвать:

- «Корег» (Словения) производительностью 34 500 м³/сут,
- «ГАриё» (Канны) производительностью 28 000 м³/сут,
- станцию в Лозанне, Швейцария (фото 10) Эта станция, на которой обрабатывается вода озера Леман (Женевского озера), была построена в 1996 г и имела производительность 43 200 м³/сут. Затем с учетом полученных результатов в 2002 г. была построена II очередь, позволившая увеличить общую производительность станции до 70 000 м³/сут. Использование ПАУ предусмотрено лишь при случайном загрязнении воды в источнике.

1.7.3. Способ **Cristal Etendu**

При рассмотрении обработки сильно загрязненной поверхностной воды мы отмечали, что именно в адсорбционных процессах возникали явления конкуренции со стороны различных загрязнений (см. п. 1.5.2.2), что требовало создания специфических реакторов.

То же самое происходит при осуществлении способа **Cristal**. ПАУ, который вводится в воду перед ультраfiltrацией, должен быть сохранен для адсорбции последних следов микрзагрязнений, тогда как основная часть ВВ или растворенных ОВ удаляется предварительно. Таким образом, можно представить себе несколько



технологических линий, начиная от простого размещения отстойника до обработки на мембранах, если в исходной воде возможны пиковые концентрации ВВ (например, станция «River Carot» на Мартинике, показанная на рис. 13), вплоть до более сложных линий, таких как на станциях в городах Флер, Авранш, Винье или Анжер во Франции (см. рис. 15, 16, фото 11, 12), где многообразие источников исходной воды и изменчивость растворенных в ней загрязнений заставляют предлагать обычную обработку осветлением с последующей стадией ультрафильтрации. В таких случаях говорят о способе *Cristal Etendu* (расширенный), схема которого показана на рис. 14. В технологической линии этого способа обычно объединяются:

- отстойник со взвешенным слоем осадка;
- песчаный фильтр;

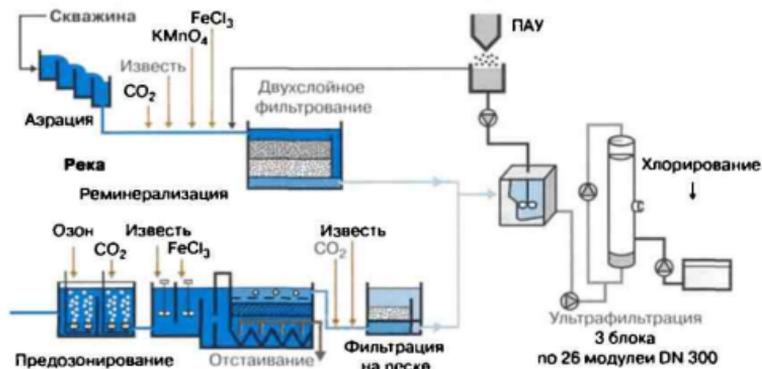
- контактный реактор с ПАУ,
- установка ультрафильтрации;
- система возерата воды от обратной промывки УФ-мембран в отстойник

Характеристики каждой стадии обработки, так же как используемые реагенты и условия функционирования (величина pH, время контакта), определяются исходя из целей обработки, а именно

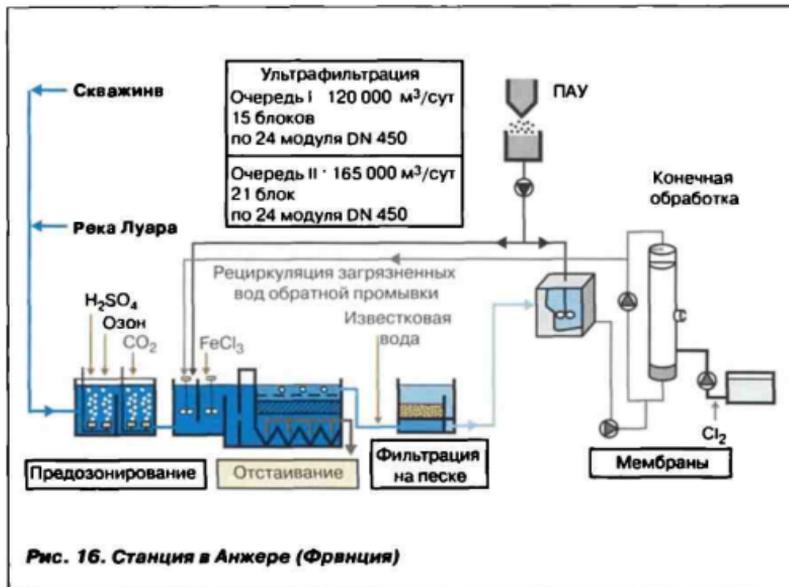
- удаление ВВ из исходной воды ↔ отстойник,
- удаление гуминовых кислот ↔ коагуляция при кислом значении pH и в контакте с осадком,
- удаление остаточных растворенных загрязнений ↔ специфическая адсорбция,
- отделение адсорбента, окончательное осветление и обеззараживание ↔ УФ-мембрана

Результаты эксплуатации

	Единица измерения	Обработанная вода		Единица измерения	Обработанная вода
Температура	С	14 16	Нитраты (N-NO ₃)	мг/л	24-34
Мутность	NTU	< 0,1	Аммоний	мг/л	< 0 05
pH		8 2 8 5	Окисляемость (KMnO ₄ /H ⁺)	мг/л	< 1
Щелочность (ТАС)	F	8	ООУ	мг/л	0,8-1
Железо	мг/л	< 0 025	Атразин	мг/л	< 0,05
Марганец	мг/л	< 0 01			



**Рис. 15. Станция в Авранше (Франция).
Производительность 10 000 м³/сут**



Другое преимущество способа **Cristal Etendu** заключается в том, что воды от обратной промывки мембран, которые содержат активированный уголь, поступают на вход в основной отстойник станции. Действительно, активированный уголь, не полностью насыщенный во время контакта с уже очищенной перед ультрафильтрацией водой, имеет резерв сорбционной емкости, которая может быть полностью использована при соответствующем времени контакта с растворенными в большом количестве ОВ в отстойнике (отстойник со слоем взвешенного осадка). В отстойнике уголь улавливается и концентрируется в слое осадка. В результате такой рециркуляции значительно снижаются потери воды в системе: от 8–10 %, обычно необходимых для обратной промывки мембран, до менее 2 % (потери с отводимым из отстойника осадком).

При реализации способа **Cristal Etendu** применение отстойника типа **Pulsator** или **Pulsatube** обеспечивает достаточное время контакта, но не настолько, чтобы пребывание адсорбента в отстойнике нанесло вред процессу очистки: действительно, известно, что активированный уголь, близкий к насыщению, может высвободить микрзагрязнения, предварительно связанные во время пика количества адсорбируемых ОВ (хроматографический эффект).

Учитывая, что многие станции питьевой воды уже имеют стадию осветления (например, в Лориене, в Вийне), способ **Cristal Etendu** успешно применяется для дополнения уже существующих технологических линий.

1.7.4. Другие случаи применения мембран в производстве питьевой воды

Существуют и другие возможности включения мембран в обычные технологические линии водоподготовки (например, способ **Cristal** после напорной флотации)



Фото 11. Станция в Анжере (Франция). Блоки с модулями ультраfiltrации

или в комбинации мембранных процессов (например, микроfiltrация или ультраfiltrация с последующей наноfiltrацией или обратным осмосом). В целом появление мембранных технологий стало поворотом в обработке континентальных вод, обеспечивающим возможность удовлетворения новых санитарных требований и более строгих норм качества

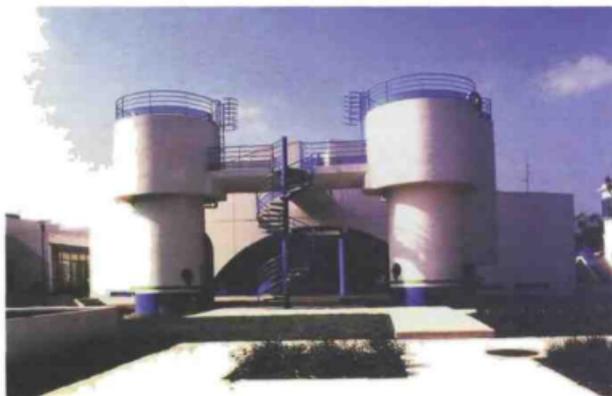


Фото 12. Станция «Vigneux-sur-Seine». Производительность 55 000 м³/сут. Доочистка озоном (два U-образных реактора) и технология Cristal Etendu

1.8. Проблемы, связанные с водорослями и зоопланктоном

Сказанное ниже касается не только воды в состоянии эвтрофикации, где эти проблемы обычно доминируют, но также более или менее всех поверхностных вод, когда они имеют как минимум сезонный характер. Рассмотрим их последовательно (см также гл. 6, п. 3)

— удаление фитопланктона: речь идет о суспензии микроводорослей в воде, часто путают эти проблемы водорослей с проблемами перифитона, смеси микро- и макроводорослей (чаще всего нитевидных), которые развиваются на погруженном носителе, в частности на стенах сооружений, открытых для доступа воздуха, если необходимо уберечь отстойники и фильтры от этого явления, в отсутствие предварительного хлорирования эффективным решением будет укрытие установок, например, непрозрачным пластиковым покрывалом или плитой (фото 13),



Фото 13. Крытый отстойник Superpulsator на станции «Morsang-sur-Seine». Производительность 75 000 м³/сут.

- удаление растворимых субстанций (метаболитов), выделяемых водорослями в среду их обитания,
- проблемы, связанные с зоопланктоном, которые можно разделить на две основные группы
 - риск проникновения и развития микробеспозвоночных в сети распределения — проблема эстетическая, но вызывающая множество жалоб потребителей
 - развитие цист простейших паразитов, среди которых паразиты *Cryptosporidium* являются наиболее опасными и наиболее трудными для удаления и, следовательно, могут служить типичными примерами для выработки стратегии

1.8.1. Удаление планктонных микроводорослей

1.8.1.1. Микропроцеживание

При использовании тканей, величина проходов в которых обычно составляет от 25 до 40 мкм, средняя степень удаления меняется от 40 до 70 % в зависимости от популяции водорослей, отдельные наиболее мелкие виды (как диатомеи *Cyclotella*, *Stephanodiscus* или зеленые водоросли *Chlorella*, *Scenedesmus*), очевидно, удаляются в меньшей степени (иногда всего 10 %), по сравнению с многоклеточными (*Pediastrum*), образующими колонии (*Asterionella*), или нитевидными (*Melosira*, *Oscillatoria*, *Anabaena*), удаление которых может достигать 70–100 %

Кроме того, подобная обработка очень мало влияет на мутность и потребность в коагулянтах. Таким образом, микропроцеживание может использоваться только в некоторых случаях перед прямой фильтрацией (медленной или быстрой) для удаления организмов, определено больших по размеру, чем проходы, но не является собственно предварительной обработкой ни с технологической ни с экономической точек зрения в линиях полного осветления, применяемых для обработки воды, богатой микроводорослями.

1.8.1.2. Прямая фильтрация

Прямая фильтрация может осуществляться только совместно с коагуляцией-флокуляцией и применяется только к воде, содержащей достаточно мало водорослей и ВВ (см. п. 1.4.2.4, табл. 3). Пределы применения этой технологии могут быть значительно расширены [5000 а.е. м./м³ (а.е. м — см. гл. 8, п. 3.1.2)], если либо использовать многослойные фильтры (на практике количество слоев может доходить до трех) с предварительным микропроцеживанием, либо проводить две последовательные фильтрации. Во всяком случае, выбираемая скорость фильтрации должна соответствовать поставленной задаче, если возможно, после пилотных испытаний.

1.8.1.3. Полная обработка

Вода, содержащая очень много водорослей, должна обрабатываться на специальной технологической линии, включающей

— **предварительное окисление**, в котором наиболее эффективным реагентом является хлор. Если же его использование невозможно (образование тригалометанов и др.), то весьма эффективным оказывается хорошо отрегулированное предварительное озонирование;

— **коагуляцию** с дозой коагулянта, соответствующей не только достижению минимальной мутности, но и **обращению в нуль дзета-потенциала**, чтобы определить уровень обработки, надо, следовательно, проводить электрофоретические исследования (на дзетаметре — см. гл. 5, п. 4.1.2.1 и рис. 7) или подсчитывать количество водорослей в различных порциях воды, отстаиваемых в процессе проведения «жар-тестов» (см. гл. 5, п. 4.1.2.2),

— **отстаивание** в аппарате со слоем взвешенного осадка (**Pulsator** с пластинами или без них), более эффективном, чем статический отстойник, отстойник **Densadeg** дает также хорошие результаты, если мутность исходной воды меньше 25–30 NTU. Предпочтение может быть отдано напорной флотации (**Flotazur P** или **Rictor-AquaDAF** — см. гл. 10, п. 4.2.2), поскольку разделение фаз при этом оказывается более легким; кроме того, она часто дает более концентрированный осадок (до 25–30 г/л) и позволяет в некоторых случаях уменьшить дозы коагулянта. Однако, если выбирают ПАУ для решения проблем незначительной привкуса,

Таблица 8
Удаление водорослей в различных технологических линиях

Обработка	Удаление, %	Lg снижение
Микропроцеживание	40 70	0,2 0,5
Прямая фильтрация	90 98	1-1,7
Отстаивание + фильтрация	— без предварительного осветления	95 99
	— после предварительного осветления	99 99,9
	— после предварительного осветления и озонирования	97 99,8
Флотация + фильтрация	— без предварительного осветления	96 99
	— после предварительного осветления или озонирования	99 99,9
Предоказнение + осветление + O ₃ + ГАУ	99 9 99	3 4
Мембранные (микрофильтрация, УФ) после отстаивания или флотации (если требуется)	99 9999	6

запаха и/или токсинов, связанных с водорослями (см. п. 1.8.2), или для решения других задач в связи с загрязнением ОВ, следует отдать предпочтение отстойнику со взвешенным слоем осадка (используемому самостоятельно или в рамках способа **Cristal Etendu** — см. п. 1.7.3).

— **фильтрацию** на песке или двухслойной загрузке, необходимой для завершения осветления.

Если станция включает, кроме того, доочистку сочетанием O₃ + ГАУ, результат будет еще лучше; однако практически полное удаление микроводорослей может быть достигнуто только при мембранном процессе. В табл. 8 приведены данные по эффективности извлечения водорослей, которой можно ожидать от различных технологий, используемых в **оптимальных условиях**.

1.8.2. Удаление метаболитов водорослей

Среди субстанций, выделяемых водорослями в водную среду (см. гл. 6, п. 3.1.2), наиболее важными в обработке воды являются вещества, обладающие **привкусом и запахом**, а также (водорослевые) **токсины**.

Обычные технологии осветления в основном неэффективны в отношении как привкуса и запаха, так и токсинов. Только озон хорошо удаляет некоторые привкусы и запахи, но его действие лишь частично распространяется на другие вещества, особенно те, молекулы которых не содержат двойных связей или ароматических циклов (например, геосмин 2-MIB — продукт жизнедеятельности синезеленых водорослей); сочетание O₃ + H₂O₂ (радикальное окисление по способу **Perozone**) дает лучшие результаты, но в сравнении с простым озонированием оно ведет к увеличенному образованию БРОУ и побочных продуктов окисления ОВ, в частности пестицидов, именно поэтому от него постепенно отказываются.

В отсутствие ООУ токсины могут быть удалены озоном даже в малых дозах; в противном случае кинетика окисления природных органических соединений оказывается более быстрой и нужно добиваться существенного остаточного содержания O₃ (на практике — с величиной параметра СТ, необходимой для обеззараживания); кроме того, возможные побочные продукты окисления токсинов еще недостаточно изучены.

Сорбция на ГАУ (5–10 объемов воды на 1 объем угля в час) является лучшим решением для этих двух групп веществ. Но насыщение угля токсинами происходит гораздо быстрее (в течение нескольких месяцев), чем веществами, придающими

привкусы и запахи (в течение несколько лет), и тем быстрее, чем больше в воде природных органических соединений. Однако, поскольку эти проблемы являются эпизодическими, особенно в отношении водородсерных токсинов, биологическая регенерация ГАУ может производиться между двумя кризисными периодами, особенно в линиях с полной доочисткой ($O_3 + \text{ГАУ}$), что является лучшим решением (см. также пп. 1.5.3 и 2.12).

В отсутствие батарей фильтров с ГАУ можно использовать ПАУ, вводимый в отстойник со слоем взвешенного осадка, но и там тоже существует сильная конкуренция с природными органическими соединениями, которая может быстро привести к росту потребности в реагентах выше экономически приемлемого уровня, если его использование будет частым; в таком случае представляет интерес использование ПАУ в рамках способа *Cristal Etendu* после удаления основной массы ОВ на стадии осветления (п. 1.7.3); следует отметить, что очень важным является выбор типа ПАУ, поскольку его необходимые дозы могут меняться в 1–5 раз в зависимости от природы ПАУ.

1.8.3. Проблемы, связанные с зоопланктоном и цистами простейших

1.8.3.1. Защита сетей от микробеспозвоночных

Во многих странах отказ от предварительного хлорирования сети усугубил проблемы их защиты от микропозвоночных. Возможные формы живых микроорганизмов (бентосовые виды, устойчивые или репродуктивные), колонизирующие сеть распределения, приносятся исходной водой, содержащей планктонные виды. Следовательно, необходимо не только блокировать весь зоопланктон (включая временные планктонные формы, яйца, цисты, личинки, бентосные организмы и др.) и фитопланктон, но и не допустить всякое развитие живых микроорганизмов внутри водопроводной станции (особенно в зернистой среде фильтров).

Другой фундаментальный принцип профилактики состоит в устранении **всех питательных веществ**, непосредственных (водоросли, бактерии и др. живые или мертвые; органические остатки) или потенциальных (БРОУ и/или NH_4^+), способных благоприятствовать оживлению бактерий, которые могли бы способствовать, в свою очередь, развитию живых микроорганизмов в сети.

С учетом сказанного можно сформулировать некоторые рекомендации для решения этой проблемы:

- оптимизация осветления, глубокое снижение мутности, содержания ООУ и фитопланктона (см. п. 1.8.1.3);
- предварительное окисление и тщательное обеззараживание, даже в отсутствие бактериального загрязнения (желательно озонированием),
- фильтрация на песке, правильно спроектированная и эксплуатируемая (достаточно частая промывка воздух + вода даже при медленном засорении), недопущение при этом любых проскоков загрязнений,
- регулярная промывка фильтров с ГАУ (летом по меньшей мере раз в неделю), в случае необходимости — хлорированной водой;
- опорожнение отстойников, как минимум, раз в год,
- обработка промывных вод фильтров, если они рециркулируют в голову сооружений;
- всегда достаточное содержание остаточного хлора в обработанной воде перед ее подачей в сеть распределения.

Кроме того, необходимо обеспечить тщательное обслуживание сети распределения, предусматривающее регулярную чистку резервуаров, промывку пожарных гидрантов, промежуточное хлорирование при необходимости и др.

1.8.3.2. Удаление цист простейших паразитов

Как упоминалось, в качестве модели здесь будут взяты ооцисты *Cryptosporidium*. В этом случае хлор и его производные неэффективны, удаление (выраженное в логарифмах снижения) количества ооцист на разных стадиях технологической линии обработки может быть оценено следующим образом

предварительное хлорирование	0,
предварительное озонирование	0–0,5,
коагуляция на фильтре	1,5–3,
отстаивание или флотация	1–2,
фильтрация на песке	1–2,
фильтрация на ГАУ	0,5–1;
озонирование (в зависимости от величины параметра СТ)	0,5–1,
ультрафиолетовое облучение ($10\text{--}20\text{ мДж/см}^2$)	3 (см гл 17, п. 6),
мембраны (микрофильтрации или УФ)	> 6

Общее снижение составляет сумму снижений на отдельных стадиях обработки. Например, технологическая линия, включающая предварительное озонирование, отстаивание и фильтрацию через песок, позволяет рассчитывать на снижение от 2lg до 4,5lg, фактически на правильно эксплуатируемых станциях оно достигает 4lg (99,99 %), но доочистка сочетанием O_3 + ГАУ обеспечивает большую безопасность (решение проблем такого типа усилило концепцию мультибарьерной обработки)

Надо отметить, что мембраны и УФИ дают лучшие результаты, чем другие технологии

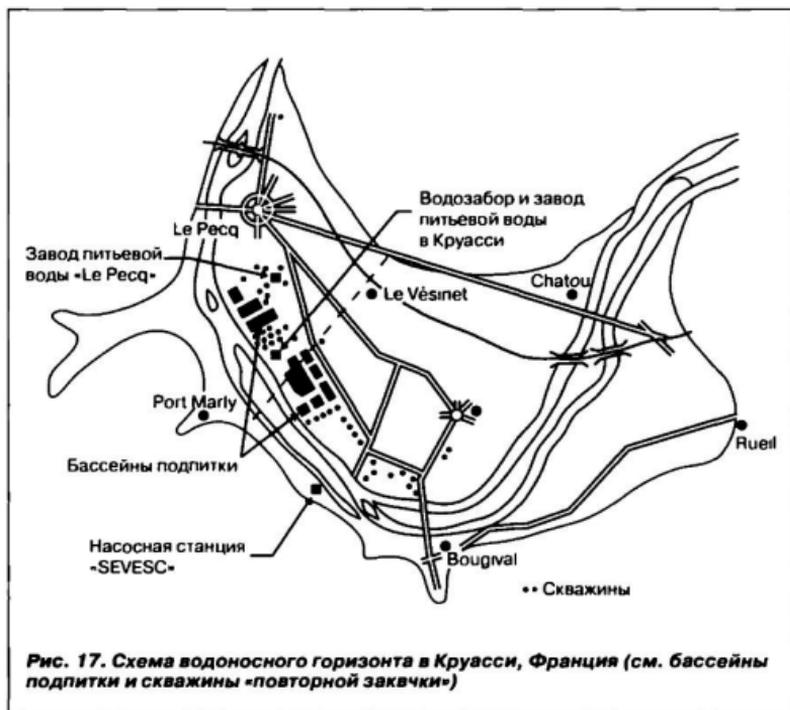
На обычных станциях рециркуляция промывных вод фильтров (см п 1.10.3) представляет собой потенциальную угрозу, приведенные выше численные значения показывают, что во избежание увеличения количества ооцист эти воды надо обрабатывать с потенциалом снижения по меньшей мере 2lg.

1.9. Подпитка водоносных горизонтов

Речь в данном случае пойдет не о специальной технологической линии обработки, а об ее стадии, которая может быть размещена либо до обычной обработки (например, подпитка водоносного горизонта дюн в Голландии водами Рейна), либо между обработкой в целях осветления и последующей доочистки (например, в Круасси, Франция)

Существует тенденция применения технологии подпитки водоносных горизонтов при повторном использовании городских сточных вод (ГСВ) в производстве питьевой воды, так как фильтрация через почву составляет дополнительный барьер биоразлагаемым ОВ и всем бактериальным загрязнениям, и поэтому часто говорят о косвенном повторном использовании. Следовательно, эта технология интересна для подпитки истощаемых водоносных горизонтов без значительного изменения качества воды, главное, чтобы обработка ГСВ была достаточно глубокой (см. гл 24, п 2) Она может также применяться в береговой зоне для защиты водоносных горизонтов хорошего качества от проникновения соленой воды во время их эксплуатации тогда говорят об «антиинтрузионном барьере»

Технология подпитки водоносных горизонтов требует геологически дифференцированного подземного горизонта, естественная подпитка которого хорошо изучена. Водоносный горизонт в Круасси, показанный на рис. 17, является этому убедительным примером. Зона дренажа состоит из белого мела пласта сенонского периода, растрескавшегося на несколько десятков метров толщины, и



покрыта недавними наносами (песок и гравий). Она подпитывается естественным образом

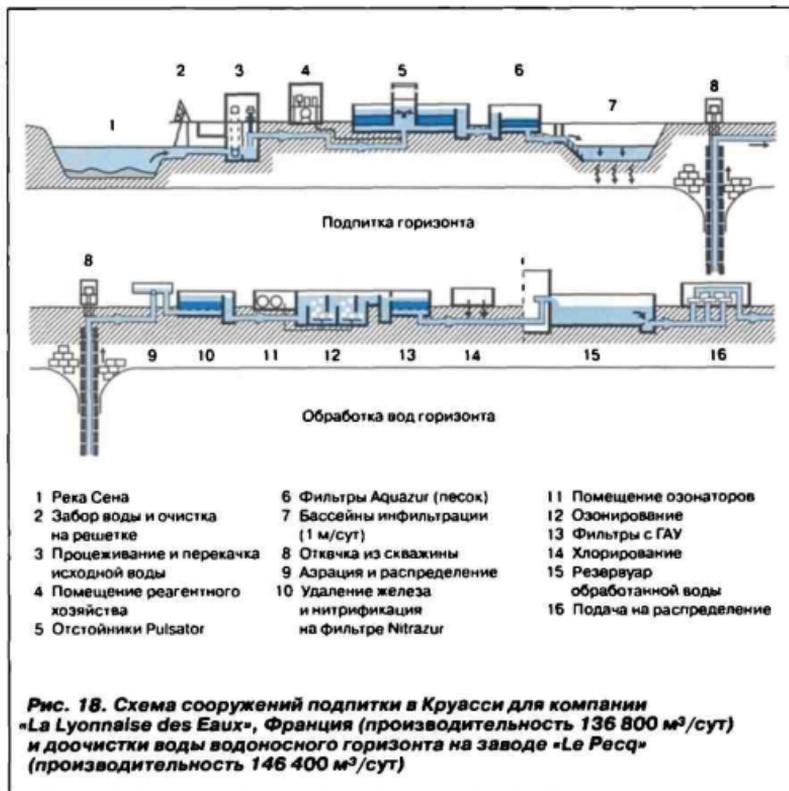
- инфильтрацией (просачиванием) дождевой воды географической зоны и окрестностей, которая все более и более уменьшается из-за урбанизации,
- инфильтрацией из реки Сены

Качество воды горизонта ухудшается вследствие загрязнения водой реки Сены. Кроме того, урбанизация порождает увеличение потребности в воде. Природная инфильтрация дает около $30 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ в год, тогда как откачка составляет $50 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ в год. Таким образом, появилась необходимость во внедрении искусственной подпитки, цель которой заключалась одновременно в **поддержании качества подземной воды** и замедлении прямого вклада реки, а также в возможности обеспечить достаточное количество воды (**эффект резервирования**), чтобы отвечать единовременным потребностям.

■ Последствия подпитки водоносного горизонта

Технология подпитки водоносного горизонта обеспечивает

- естественное удаление всех патогенных микробов и уменьшение содержания усваиваемых **ОВ** в результате действия биологической мембраны, которая развивается в глубине бассейна, и фильтрации через почву,



— доступность резервирования воды хорошего качества, горизонт играет роль резервуара, и подпитка не используется, когда качество исходной воды является приемлемым. В случае ненормального загрязнения она останавливается.

Однако во время своего движения под землей вода загрязняется такими веществами, как Fe, Mn и NH₄ (в восстановленном состоянии), которые должны быть удалены из нее перед доочисткой и подачей в сеть распределения.

На рис. 18 показана полная технологическая линия — осветление перед реинфильтрацией и доочистка после закачки

■ Уход за бассейнами подпитки

Когда потеря напора в каком-либо одном бассейне инфильтрации слишком велика (слишком развитая биологическая мембрана) и уровень поднимается, необходимо прервать подачу воды в этот бассейн и осушить его. После естественной сушки поверхность мембрана удаляется и вывозится из бассейна. В этой операции теряется немного песка, который защищает зону инфильтрации. До-

бавление нового песка происходит только через определенный период функционирования.

1.10. Обработка осадков

1.10.1. Происхождение осадков

Осадки, остающиеся после обработки воды питьевого назначения, образуются в результате извлечений или прочисток на стадии отстаивания (или флотации), если они предусмотрены, и от промывки фильтров, а иногда от обратной промывки мембран осветления

Взвешенные вещества, содержащиеся в таких осадках, включают:

- вещества, присутствующие в воде до обработки: планктон, выпавшие хлопьями минеральные и органические вещества, гидроксиды металлов, образующиеся из ионов, присутствующих в сырой воде (железо, марганец),
- гидроксиды металлов, образовавшиеся из реагентов коагуляции-флокуляции, введенных во время обработки,
- иногда — адсорбирующие материалы (ПАУ, остатки оторвавшейся биологической пленки с фильтров с ГАУ)

В случае декарбонатации известью существенную часть осадков составляет карбонат кальция

1.10.2. Коагуляция на фильтре

Средняя концентрация ВВ в промывных водах фильтров может меняться от 200 до 1500 г/м³. Необходимо использовать установку сгущения, способную давать осадки, концентрация ВВ в которых составила бы как минимум 20 г/л, чтобы впоследствии их можно было подвергнуть обезвоживанию. Установка **Denapadag** особенно хорошо приспособлена для этой цели

1.10.3. Полная обработка воды

Когда технологическая линия осветления включает коагуляцию, флокуляцию, первичное разделение фаз (отстаивание или флотацию) и фильтрацию, сооружение обработки воды производят два типа осадка

- **промывные воды фильтров** эти воды накапливаются в резервуаре, объем которого соответствует объему промывных вод одного или (лучше) двух фильтров. Раньше они возвращались в голову станции без какой-либо предварительной обработки, в настоящее время это не рекомендуется (в некоторых странах даже запрещается). Действительно, отказ от предварительного хлорирования на многих станциях приводит иногда к неконтролируемому развитию водорослей и/или бактерий на фильтрах и в системе рециркуляции, что может ухудшить качество поступающей на обработку воды. Кроме того, если есть подозрение о присутствии цист простейших паразитов, которые будут эффективно задерживаться фильтрами и присутствовать в промывных водах, то можно ожидать, что они будут насыщать и поступающую на осветление воду. Следовательно, необходимо их извлечь вместе с ВВ перед рециркуляцией, для чего обычно используют следующие установки и технологии

- статический сгуститель;
- статический сгуститель с рециркуляцией,
- флотацию [например, станция в Муле (Франция), на которой напорная флотация применяется для двух различных целей — см фото 14].

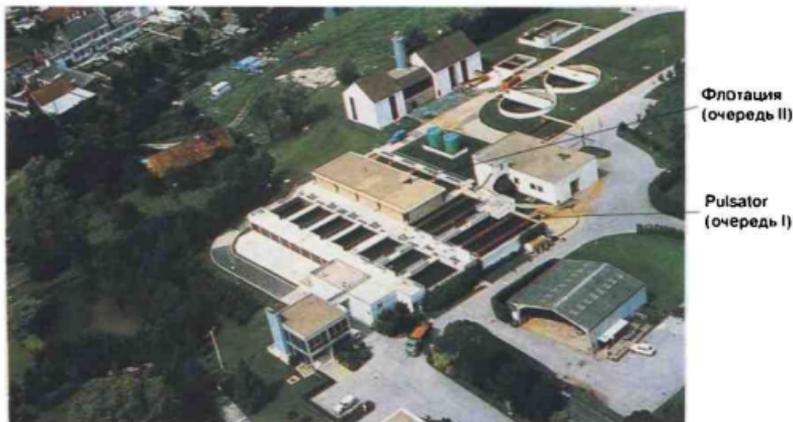


Фото 14. Общий вид станции в Муле (Пв-де-Кале, Франция). Производительность после расширения 28 800 м³/сут с осветлением флотацией и со сгущением осадков I очереди и промывных вод фильтров также флотацией

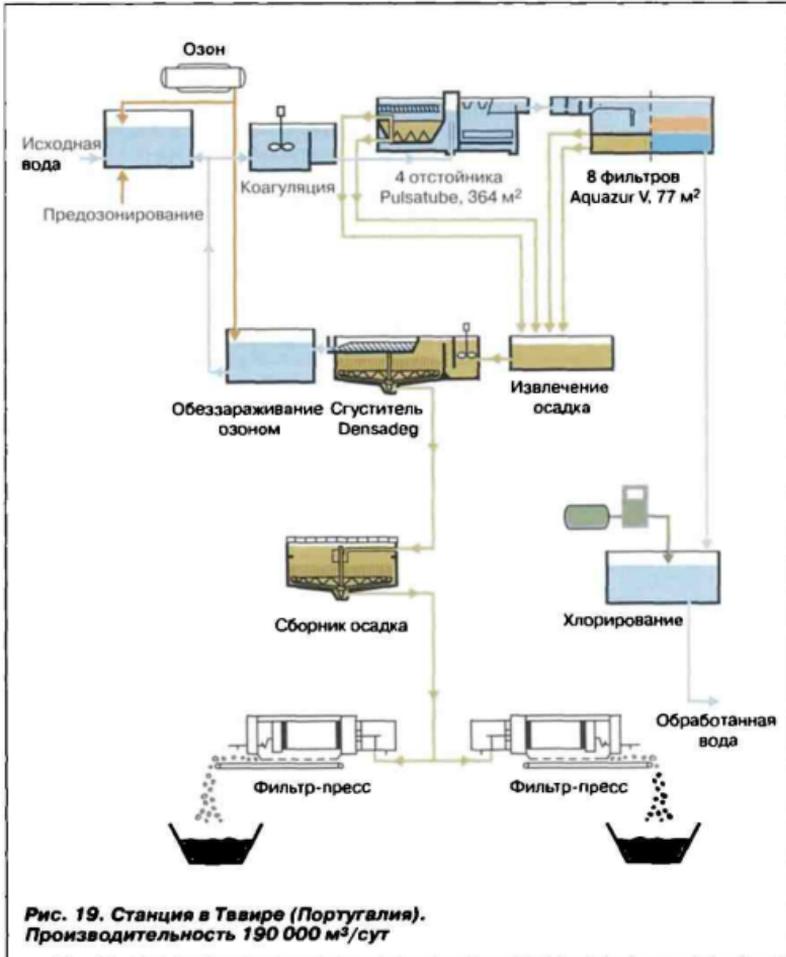
• установку **Densadeg** (например, станция в Тавире, Португалия, — рис 19). — осадки, получаемые на стадии первичного разделения фаз: объем этих осадков зависит от природы воды и использованной технологии разделения фаз. Они составляют в среднем от 0,5 до 2 % обработанного объема воды. Если невозможно отвести осадки в городскую канализацию, должна быть предусмотрена их обработка на месте с использованием технологий сгущения и обезвоживания, которые рассматривались в гл 18. Можно отметить, что стадия сгущения осадков исключается только при применении установки **Densadeg**, которая, работая при повышенных гидравлических нагрузках (15–20 м/ч), позволяет реализовать комбинированную обработку промывных вод фильтров и осадков, извлеченных из отстойников.

Если коагулянтом является сульфат алюминия, можно в некоторых случаях рассматривать его восстановление (раскисление), хотя обычно эта операция экономически не оправдана.

2. Специфическая обработка

Как упоминалось в начале главы, в данном разделе речь пойдет прежде всего об удалении нежелательных элементов, обычно обнаруживаемых в подземных водах, к которым, в зависимости от их происхождения применяют набор разнообразных технологий и которые обрабатывают на более или менее сложных технологических линиях в том случае, когда многие из этих элементов представлены одновременно (например, Fe, Mn, NH₄, NO₃, H₂S).

Иногда можно обнаружить некоторые из нежелательных элементов и в поверхностных водах, для каждого случая их удаление обеспечивается либо одним из об-



щих способов, рассмотренных выше, либо дополнительной стадией обработки, которая встраивается в базовую технологическую линию для вод из озер и рек

Будут также рассмотрены вопросы извлечения нежелательных элементов (ОВ, тяжелые металлы, металлоиды, радиоактивные вещества и др.), которые могут присутствовать во всех типах вод и степень удаления которых обычными методами может быть очень различной в зависимости от их природы, вынуждающей в отдельных случаях использовать специфические методы [например, As(III) и As(V), F⁻ и др.].

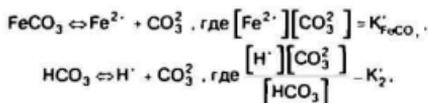
2.1. Удаление железа

2.1.1. Состояние железа в природных водах

В поверхностных водах железо находится главным образом в окисной форме [Fe(III) — трехвалентное железо] в виде осадка, часто связанного со ВВ, тогда оно удаляется в процессе осветления. Но в глубоких слоях некоторых источников эвтрофицированных вод, лишенных кислорода, и в большей части подземных вод железо встречается в закисной форме [Fe(II) — двухвалентное железо], это восстановленное железо является растворенным и часто образует комплексы

■ Железо закисное

Свободное железо существует в ионизированной форме: обычно Fe^{2+} или реже — FeOH^+ ($\text{pH} = 8,3$). В воде, полный щелочной титр ТАС которой велик, ион Fe^{2+} встречается прежде всего в гидрокарбонатной форме (или бикарбонатной), и растворимость железа, ограниченная выпадением малорастворимого карбоната, соответствует уравнению



откуда

$$[\text{Fe}^{2+}] = \frac{K'_{\text{FeCO}_3} [\text{H}^+]}{K_2' [\text{HCO}_3^-]} = \frac{[\text{H}^+]}{[\text{HCO}_3^-]}$$

поскольку численные значения обеих констант очень близки

После подстановки существующих значений вышеприведенное уравнение дает

$$\text{Fe(II) растворимое, мг/л} = 27 \cdot 10^7 \frac{10^{\text{pH}}}{\text{ТАС}}$$

и показывает, что растворимость растет, когда уровень pH и титр ТАС снижаются

Примечание 1. Если концентрация растворенного железа оказывается выше теоретического расчетного значения и избыточные ионы Fe^{2+} не выпадают в осадок в форме FeCO_3 (сидерит), надо предполагать присутствие комплексов железа — источника трудностей для извлечения этого элемента физико-химической обработкой (см. п. 2.1.2)

Примечание 2. В присутствии H_2S растворимость гораздо ниже (по причине низкого произведения растворимостей сульфида железа, который поэтому выпадает в осадок).

■ Комплексованное железо

Речь идет о комплексах, которые образуют ионы Fe^{2+} или Fe^{3+}

— минеральные: силикаты, фосфаты или полифосфаты, сульфаты, цианиды и др.;

— органические: явления хелатности (образование внутриклеточных соединений), в частности, с гуминовыми, фульвовыми, таниновыми и другими кислотами

Примечание. Железо часто ассоциировано с марганцем (см п 2 2) и/или с аммонием (см. п. 2.3).

Таким образом, чтобы определить технологию деферризации, недостаточно иметь данные об общем содержании железа — нужно знать различные формы (состояния), в которых этот элемент может существовать (рис 20), что предполагает знание и всех параметров, способных влиять на это формообразование.

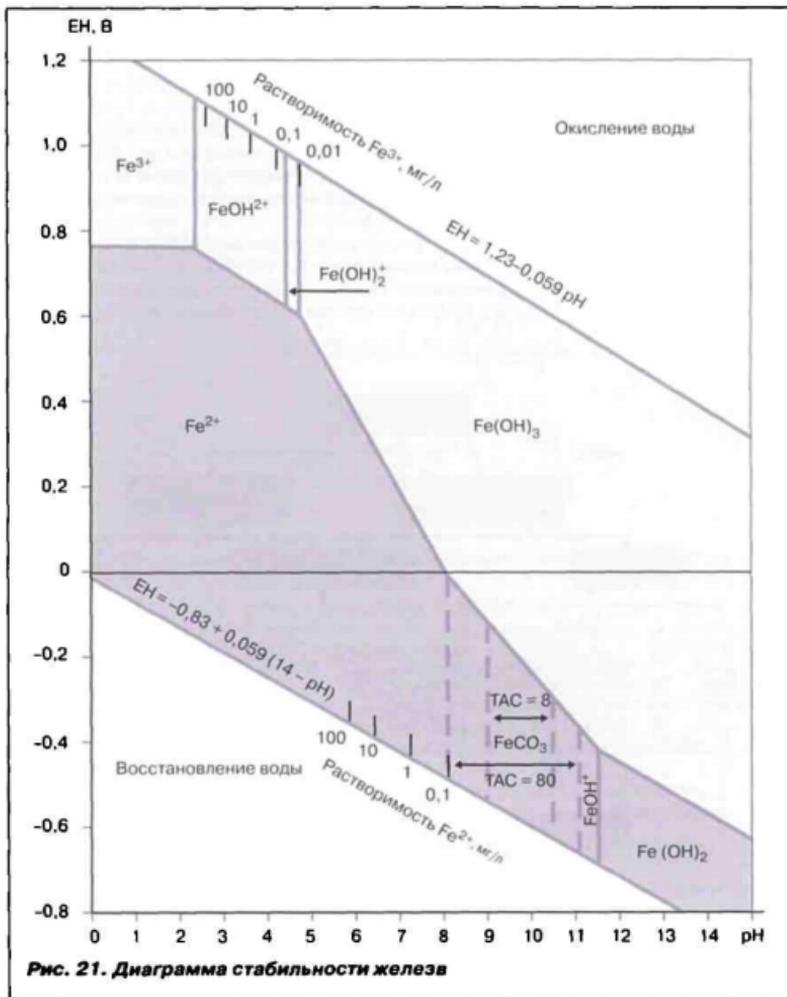
Чтобы обеспечить репрезентативность проб, необходимо определить на месте все нестабильные характеристики воды после бурения и оснащения скважины измерить температуру, величину pH, окислительно-восстановительный потенциал ЕН, растворенный O_2 , свободный CO_2 , растворенное железо и др., а также на месте или в лаборатории определить содержание растворенных кремнезема и органических веществ (две наиболее распространенные причины комплексобразования), а также других веществ, которые требуют совместной или одновременной обработки с деферризацией (Mn , NH_4 , H_2S , реминерализация и др.) Кроме того, микроскопические исследования также рекомендуются для определения отсутствия или присутствия железобактерий.

Формы железа в воде зависят прежде всего от величины pH и окислительно-восстановительного потенциала. Из рис. 21 видно, что возможен переход от растворенной формы железа (например, Fe^{2+} или $FeOH^+$) к нерастворенной в виде осадка $[FeCO_3, Fe(OH)_2]$ или $Fe(OH)_3$ в результате увеличения либо потенциала



Рис. 20. Формы существования железа в воде

(окисление), либо значения pH, либо и того и другого одновременно. Именно на этих принципах и особенно на последовательности [окисление Fe^{2+} — осаждение $\text{Fe}(\text{OH})_3$ — фильтрация] основаны различные физико-химические способы обработки.



2.1.2. Физико-химическая деферризация

Технология деферризации с окислением воздухом и фильтрацией долгое время была самой используемой, в особенности для вод из скважин. В известных случаях можно добавить некоторые виды дополнительной обработки, такие как корректировка величины pH, химическое окисление, флокуляция, осветление и др. Всегда полезно аэрировать воду с глубины, лишенную кислорода, даже если используется химический окислитель (предотвращение проблем при распределении, коррозия, привкусы и запахи). Аэрация становится тем более необходимой, если вода содержит H_2S .

Озон и перманганат калия являются лучшими дополнительными окислителями, особенно в присутствии комплексованного железа. При высоком содержании ОВ или марганца следует, если возможно, экспериментально определять вводимую дозу.

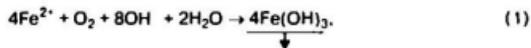
2.1.2.1. Простая деферризация без отстаивания (аэрация и фильтрация)

■ Принцип

Технология простой деферризации без отстаивания предназначена для обработки подземных вод, максимальное содержание железа в которых составляет около 7 мг/л и которые в то же время не имеют других неблагоприятных характеристик (примесь марганца, цветность, мутность, гуминовые кислоты) и отличаются допустимым содержанием аммония и умеренной карбонатной агрессивностью.

Первая стадия обработки при деферризации основана на **окислении** двухвалентного железа кислородом воздуха. Аэрация (см. гл. 17, п. 1) может осуществляться либо при атмосферном давлении, либо под давлением нагнетания в сеть, в последнем случае нужно избегать повторного перекачивания и любого контакта воды с внешней средой. Аэрация при атмосферном давлении часто позволяет легко удалить малейшие следы агрессивного углекислого газа, что позволяет исключить дорогостоящую нейтрализацию, и даже H_2S (см. п. 2.5).

Скорость окисления двухвалентного железа кислородом зависит от многих факторов, в частности температуры, величины pH, содержания железа и растворенного кислорода. Реакцию можно написать в следующем виде.



и ее кинетика выражается уравнением

$$\frac{d(Fe^{2+})}{dt} = -k(Fe^{2+})(OH^-)^2 P_O \quad (2)$$

где

P_O — парциальное давление кислорода;

k — константа, зависящая от температуры и буферной емкости исходной воды.

Уравнение (2) показывает, что реакция протекает тем быстрее, чем выше уровень pH и чем ближе вода к пределу насыщения кислородом. Время окисления, определенное в лаборатории на искусственно приготовленном образце воды, может оказаться существенно меньшим на большей части установок благодаря определенному каталитическому эффекту, вызванному главным образом предыдущими отложениями. Присутствие гуминовых кислот также замедляет окисление железа. Некоторые биологические явления, рассматриваемые далее, происходят таким же образом.

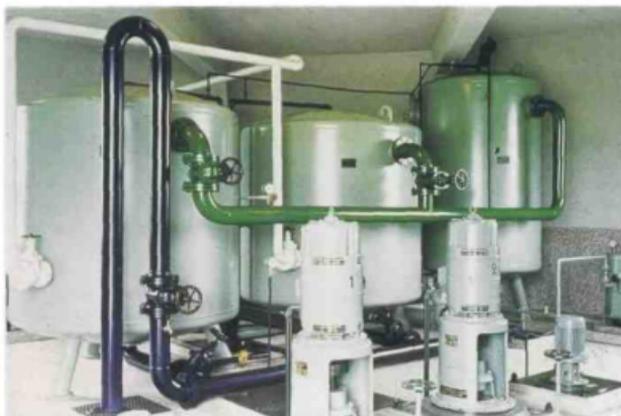
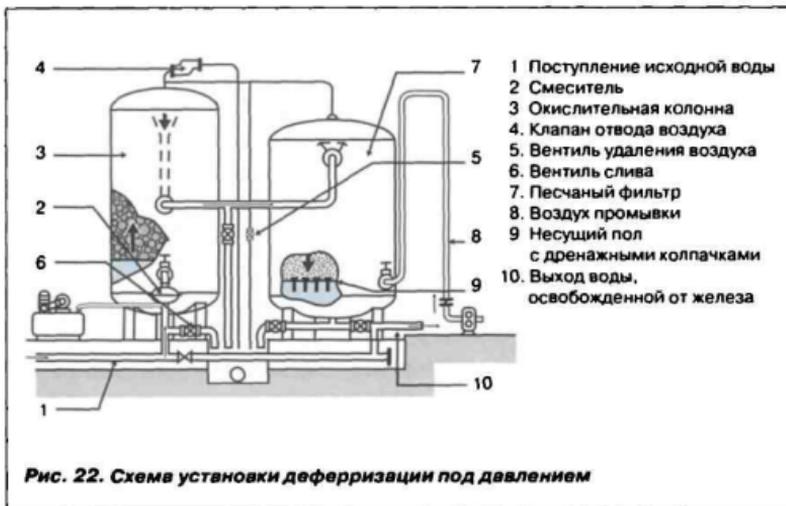
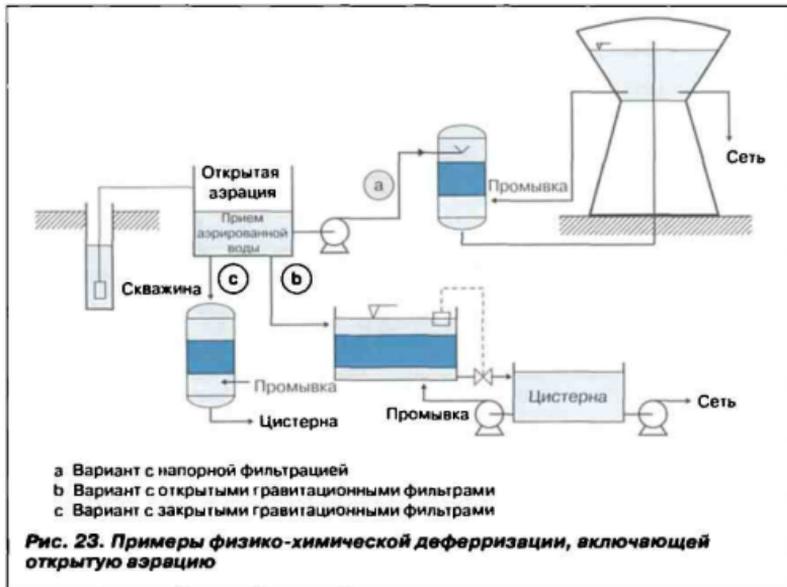


Фото 15. Физико-химическая деферризация с помощью типичной напорной установки. Производительность 600 м³/сут

Полученная дисперсная фаза является в основном хлопьевидным гидроксидом $\text{Fe}(\text{OH})_3$ в соответствии с уравнением (1). К нему могут добавляться в переменном количестве, в зависимости от местных условий, оксигидроксиды $n\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot m\text{H}_2\text{O}$, часть из которых имеют кристаллическую природу, а иногда FeCO_3 (вода с большой величиной титра ТАС). Поэтому условия обработки и эффективность **фильтрации**, которая следует за окислением, могут сильно отличаться на разных установках.



По всем этим причинам оптимальный эффективный размер частиц фильтрующего материала находится между 0,6 и 1 мм, а скорость фильтрации — между 5 и 15 м/ч. Вес задержанного железа, приходящийся на единицу фильтрующей поверхности, также сильно различается: в зависимости от конкретных условий от 200–1000 г Fe на 1 м² площади песчаной загрузки до 2000 г на 1 м² на двухслойных фильтрах (антрацит + песок) — возможность обработки, предусмотренная для трудных случаев. Высокая начальная концентрация Fe²⁺ способствует более эффективной фильтрации.

Некоторые вещества, например гуминовые кислоты, силикаты, фосфаты, полифосфаты, играют роль ингибиторов в окислении, отстаивании и фильтрации гидроксида железа. Так, скажем, присутствие кремнезема ведет к образованию комплекса FeSiO(OH)₂⁺, стабильного в щелочной среде (тогда как увеличение значения pH, с другой стороны, необходимо для окисления и гидролиза железа, откуда вытекает необходимость поиска компромисса).

Этих явлений можно избежать путем дополнительной обработки, окислением (перманганат калия, озон), коагуляцией (сульфат алюминия) или флокуляцией (альгинат или подходящий полимер), выбираемой в каждом конкретном случае.

■ Реализация

Наиболее часто используется установка напорного типа (рис. 22), которая включает.

- окислительную башню, содержащую слой пуццолана, который разбивает поток воды и обеспечивает большую поверхность окисления за счет ее контакта с воздухом;



- фильтр с обратной промывкой водой и воздухом
- На фото 15 показан пример такой реализации.

Гравитационные установки включают азирацию при атмосферном давлении (каскад, разбрызгивание и др.) с последующей открытой фильтрацией, в ходе которой обрабатываемая вода стекает по контактной массе загрузки, или закрытой фильтрацией (в последнем случае с промежуточным перекачиванием или без него). На рис. 23 приведено три примера реализации согласно этому принципу (промывка также осуществляется воздухом и водой).

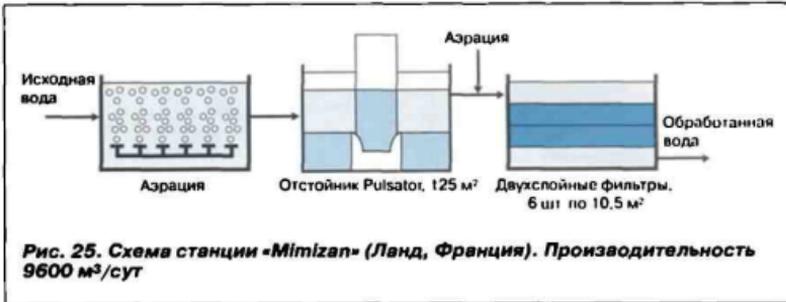
Окисление может осуществляться также озоном, как, например, с помощью установки (рис. 24), которая включает:

- каскадную азирацию. Каскад располагается над резервуаром озонирования и дает возможность первичного окисления остаточным озоном, выходящим из резервуара озонирования,
- резервуар озонирования для основного окисления железа;
- введение альгината для улучшения качества хлопьев;
- фильтрацию на двухслойном фильтре:
 - скорость фильтрации. 7 м/ч,
 - песок эффективный размер равен 0,5 мм, H = 0,4 м;
 - гидрантрацит: эффективный размер равен 0,85 мм, H = 0,5 м.

2.1.2.2. Деферризация с отстаиванием

Между азирацией и фильтрацией необходимо вводить отстаивание (см. пример технологической линии станции «Mitzap» на рис. 25) в следующих случаях:

- при высоком содержании железа в исходной воде, ведущем к избыточному объему осадка,
- при значениях цветности, мутности, содержания гуминовых кислот, комплексобразующих агентов и др., вызывающих значительное замедление скорости окисления и выпадения железа и/или требующих введения коагулянта (сульфата алюминия или хлорного железа) в дозах, превышающих 10 г/м³ коммерческого продукта

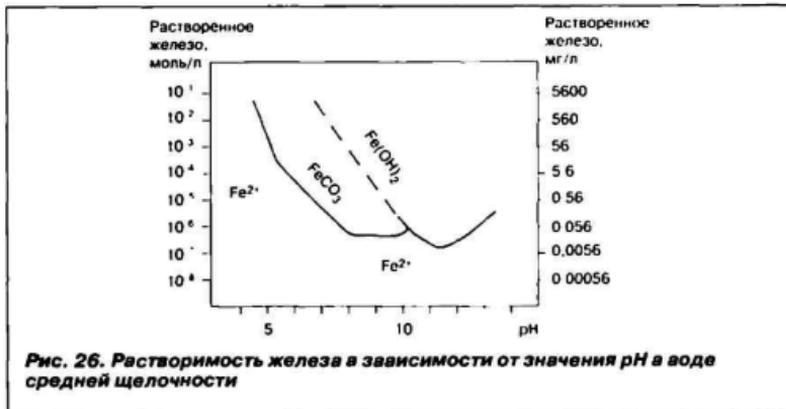


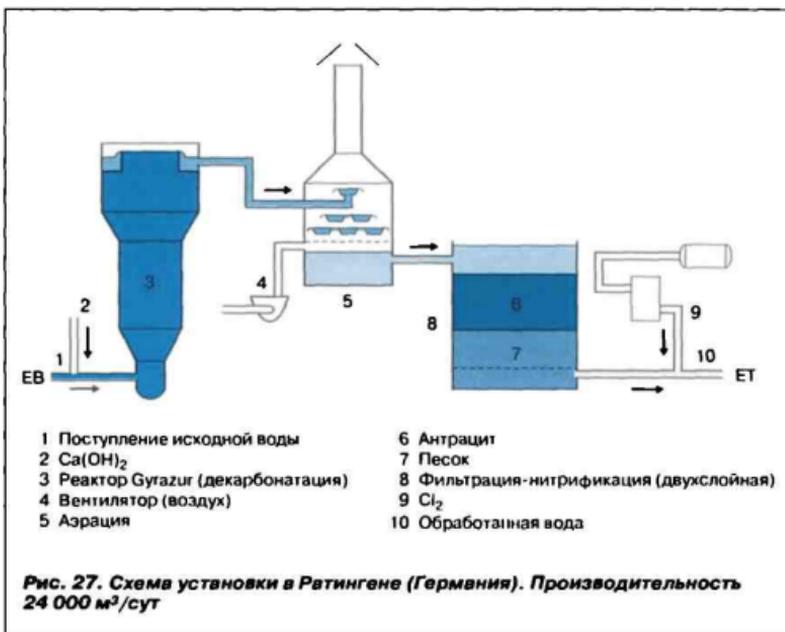
Способы контактного отстаивания с взвешенным осадком особенно подходят для обработки этих вод. В качестве варианта легкие хлопья гидроксида железа, полученные из обычно мутных подземных вод, также можно отделять напорной флоатацией.

2.1.2.3. Обработка, связанная с удалением карбонатов

Декарбонатация известью, порождающая повышенное значение pH, благоприятна для удаления железа и марганца. Так, при pH = 8,2 осаждение карбоната железа является практически полным (особенно когда он осаждается совместно с CaCO₃). Аналогично при pH = 10,5 практически полностью осаждается гидроксид железа (рис. 26).

Частичная декарбонатация при величине pH около 8 может, таким образом, повлечь за собой полную деферризацию. В некоторых случаях, особенно в аппаратах декарбонатации с псевдоожиженным слоем (способ *Gyragur* — см гл 10, п 3.7), то же значение pH дает удовлетворительный уровень удаления марганца, тогда как теоретически этот процесс должен быть сопряжен с полной декарбонатацией при pH = 9,5 или 10. Именно по этому принципу функционирует установка (рис. 27), ко-





торая осуществляет частичную декарбонатацию, деферризацию, деманганизацию и нитрификацию

2.1.3. Биологическое удаление железа — способ *Ferazur*

2.1.3.1. Принцип

В гл 2, п 1 8, и в гл 4, п 6 4, было показано, что многочисленные бактерии способны, благодаря вырабатываемым ферментам и биополимерам, биологически окислять двухвалентное железо, катализируя процесс окисления растворенным кислородом даже в небольших концентрациях и фиксируя его на своих клеточных мембранах, оболочках, ножках и др. Сформированные диспергированные частицы в этом случае прочно срастаются с бактериальными полимерами. Кроме того, в противоположность процессам, происходящим при физико-химической деферризации, в данном случае возникают оксигидроокиси кристаллической природы, в особенности лепидохроцит $\gamma\text{-FeOOH}$. Условия задержания выпавшего железа на биологических фильтрах, таким образом, много лучше, чем на установках, функционирующих в физико-химическом режиме. Эти бактерии способны развиваться в условиях, когда физико-химическое окисление невозможно, если, например:

- концентрация растворенного кислорода 0,2–0,5 г/м³,
- значение pH = 7,2,
- окислительно-восстановительный потенциал ЕН = 100–200 мВ;

— окислительно-восстановительная способность гН несколько больше 14

При гН < 14 бактерии остаются бездействующими, тогда как при значениях больше 20 возникает конкуренция с физико-химическим окислением и отстаиванием. Зона I на рис 28 определяет область, особенно подходящую для биологической деферризации.

В действительности граница разделения между областями физико-химической и биологической деферризации не очень четкая; в области «физико-химической» присутствие ингибиторов замедляет скорость окисления и процесс биологической деферризации может стать преобладающим. В связи с этим часто проводят пилотные испытания в целях определения оптимальных условий обработки

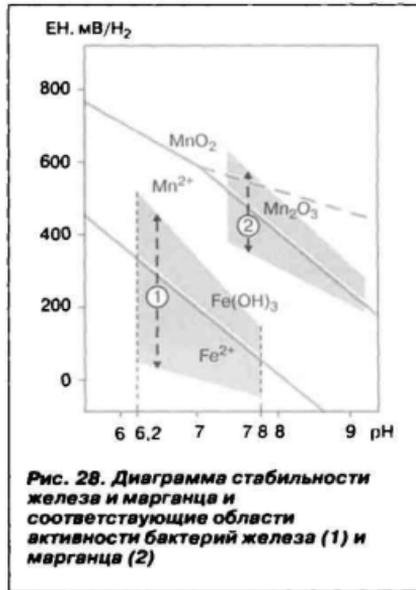


Рис. 28. Диаграмма стабильности железа и марганца и соответствующие области активности бактерий железа (1) и марганца (2)

2.1.3.2. Преимущества биологической деферризации

По сравнению с физико-химическим процессом преимущества биологической деферризации можно оценить следующим образом

- **быстрое окисление** не нужна окислительная башня, достаточно введения воздуха под давлением в трубопровод,
- не нужны **реагенты** (такие как дополнительный окислитель, вещество, корректирующее значение pH, флокулянт),
- окисленное железо задерживается в **более компактной форме**, это определяет примерно в пять раз большую гряземкость фильтра (всегда состоящего из однородного песка);
- **высокая скорость фильтрации** благодаря твердости биологических хлопьев и большему эффективному размеру частиц песка (1, 1 – 1,5 мм) можно фильтровать примерно в пять раз быстрее, чем при физико-химической обработке, с сохранением той же продолжительности фильтроцикла, скорость процесса может достигать в некоторых случаях до 40 и даже 50 м/ч,
- **экономичная промывка** процент промывной воды к объему фильтрата примерно в пять раз меньше, чем при физико-химической деферризации. В некоторых случаях допустима промывка фильтров даже исходной водой. Однако не рекомендуется пользоваться для этой цели водой, обработанной хлором, так как это может частично уничтожить популяцию деферризирующих бактерий,
- **упрощенная обработка осадка**, промывные воды более высокой концентрации хорошо сгущаются и обезвоживаются

2.1.3.3. Реализация

Установка напорной биологической деферризации (рис. 29) включает

- экономичную систему аэрации (1); аэрация может осуществляться либо в статическом смесителе, либо в напорном резервуаре для установок под давлением с нагнетанием воздуха (2), либо рециркуляцией части обработанной азрированной воды (3);
- реактор *Ferazur* (4) с большой скоростью массообмена,
- в некоторых случаях дополнительную систему аэрации (5) для повышения содержания кислорода до требуемой величины,
- в случае, когда промывка не может осуществляться необработанной водой, резервуар нехлорированной промывной воды (6);
- резервуар обработанной воды (7) после хлорирования (8);
- блок промывки, включающий промывку исходной водой (9) или обработанной водой (10) и вспомогательный компрессор для промывки (11).

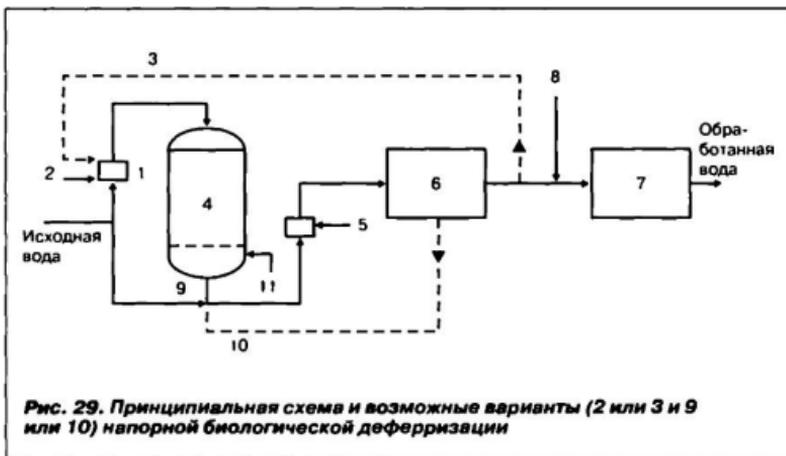


Рис. 29. Принципиальная схема и возможные варианты (2 или 3 и 9 или 10) напорной биологической деферризации

Пример реализации этой установки показан на фото 16

Фильтрация также может осуществляться **гравитационно** на открытых (безнапорных) фильтрах, прежде всего при большой производительности, как на установке в Ломе (фото 17), где запроектированы специальные сооружения типа «Каскад» с учетом характеристик исходной воды и необходимых для биологической деферризации условий.

Примечание Пуск установки биологической деферризации менее быстрый, чем при физико-химической обработке. Он требует обычно от 1 до 10 дней для посева и выращивания микроорганизмов (начиная с ферробактерий, естественно присутствующих в исходной воде)

Если в исходной воде присутствует H_2S , его удаляют либо в начале технологической линии (гравитационная деферризация), либо биологической обработкой (обработка под давлением), см. п. 2.5



Фото 16. Установка биологической деферризации в Вест-Пинчбеке (компания «Anglian Water», Великобритания). Производительность 36 000 м³/сут



Фото 17. Станция гравитационной биологической деферризации в Ломе (Того). Производительность 52 800 м³/сут, четыре фильтра по 25,5 м²

2.2. Удаление марганца

2.2.1. Естественное состояние марганца в природных водах

Марганец представляет собой элемент, часто присутствующий в почве. Встречаются различные минералы марганца, главным образом оксиды (пиролюцит, вернадит и др.), а иногда карбонаты (родохрозит), силикаты, сульфаты и др.

В природных водах марганец обычно присутствует в растворимой ионизированной форме Mn^{2+} , иногда $MnOH^+$ (высокое значение pH). Он может образовывать комплексы с бикарбонатами, сульфатами и силикатами, одновременно находящимися в воде, так же как и с некоторыми органическими веществами (гуминовыми и фульвовыми кислотами). Марганец часто присутствует в природных водах совместно с железом и аммонием, но есть случаи, когда в наличии остается только марганец

2.2.2. Физико-химическое удаление марганца

На рис. 30 приведена диаграмма стабильности наиболее распространенных форм марганца.

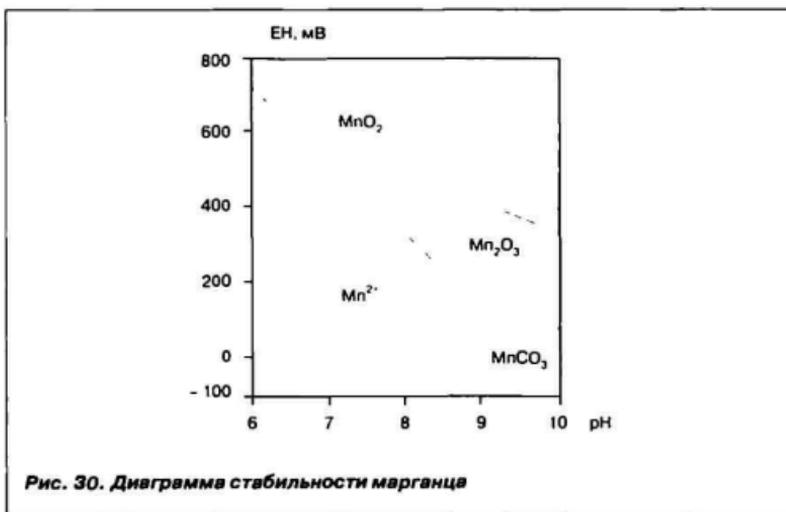


Рис. 30. Диаграмма стабильности марганца

2.2.2.1. Окисление кислородом

Марганец Mn^{2+} очень медленно окисляется в MnO_2 кислородом согласно реакции с кинетикой в форме

$$-\frac{d(Mn^{2+})}{dt} = k_0(Mn^{2+}) + k(Mn^{2+})(MnO_2),$$

где

$$K = K' P_{O_2} (OH^-)^2$$

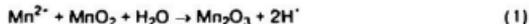
Окисление достигает заметной скорости только при значении pH выше 9,5, как показано на рис. 31

Реакция Mn^{2+} с кислородом зависит от температуры. При переходе от 11 к 22 °C ее скорость увеличивается в пять раз, но при обычных значениях pH время контакта остается трудно совместимым с промышленной эксплуатацией

Присутствующий диоксид марганца действует как катализатор. Именно это наблюдалось на некоторых станциях, работающих при повышенных значениях pH, где после функционирования в течение некоторого времени с другими окислителями песок покрывался слоем отложений MnO_2 . Однако данного эффекта недостаточно для получения воды, совершенно не содержащей марганца.

2.2.2.2. Окисление оксидом марганца IV

Было установлено, что при невысоких значениях pH MnO_2 выполняет функцию уже не катализатора, а окислителя согласно реакции



В этом случае его надо периодически регенерировать перманганатом



Общий баланс реакций (1) и (2) —



На практике вместо насыщения песка марганцем можно использовать фильтрующие материалы, состоящие из MnO_2 («зеленый марганцевый песок», «полярит» и др.), которые могут быть смешаны в более или менее существенном соотношении с песком и которые должны также регулярно регенерироваться.

2.2.2.3. Окисление хлором

Хлор окисляет марганец при величине pH < 9,5 лучше, чем кислород, но те же самые фильтрующие материалы могут быть использованы (pH ≥ 8) в качестве катализаторов окисления ионов Mn^{2+} хлором. Иногда требуется предварительное отстаивание и предварительная фильтрация в кислой среде для удаления ОВ (в случае некоторых поверхностных мягких и цветных вод).

2.2.2.4. Окисление диоксидом хлора

Как было показано в гл. 3, п. 12, эта реакция протекает относительно медленно и в присутствии ОВ дает хлориты, поэтому использовать ее не рекомендуется.

2.2.2.5. Окисление перманганатом калия

Между двухвалентным марганцем и перманганатом происходит окислительно-восстановительная реакция согласно приведенному выше уравнению (3).

Как видно, потребление $KMnO_4$ является таким же, как и при промежуточном окислении MnO_2 регенерируемым $KMnO_4$ (см п. 2.2.2.2); преимущество последнего метода состоит в возможности располагать «регулятором» в случае изменений



Рис. 31. Удаление марганца окислением (насыщением кислородом)

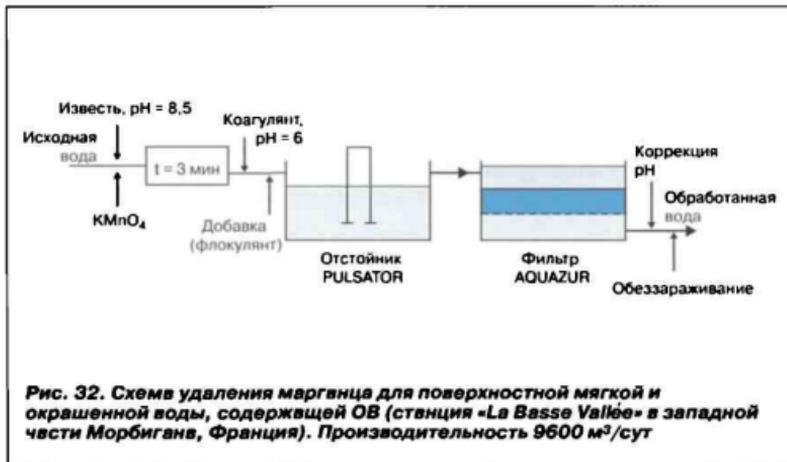
концентрации Mn^{2+} и таким образом подавать постоянную дозу $KMnO_4$, установленную для среднего значения («непрерывная регенерация»).

Теоретически на 1 г Mn требуется 1,9 г $KMnO_4$, но на практике эта величина зависит от величины pH и состава воды. Дело в том, что часть перманганата участвует в окислении присутствующих в воде органических восстановителей. Кроме того, необходимо тщательно контролировать вводимую дозу: избыток $KMnO_4$ окрашивает воду в розовый цвет, который затем переходит в желтый в распределительных сетях.

Если марганец находится не в виде комплексного соединения, оптимальным значением pH является 7,2–7,3 для времени контакта в пределах 5 мин. Если марганец образует комплексы с органическими соединениями, время реакции может увеличиваться до 20 мин. В этом случае можно ускорить реакцию, повысив уровень pH, как минимум, до 8,5.

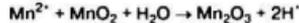
Именно $KMnO_4$ чаще всего применяется для физико-химической деманганации. Для подземных вод концепция станций та же, что и для простой деферризации (см. рис 22 и 23). Независимо от того, содержит вода только марганец или железо и марганец, вначале проводят аэрацию (открытую или под давлением), по-прежнему необходимую для воздействия на легкоокисляемые вещества (Fe^{2+} , H_2S и др.) и для обогащения воды растворенным кислородом (защита от коррозии и неприятных запахов в сети), затем между аэрацией и фильтрацией вводится перманганат, как и некоторые другие возможные реагенты. Фильтрация осуществляется с той же скоростью, но на более тонком песке, если вода содержит только марганец: эффективный размер частиц песка составляет 0,55–0,75 мм.

Для обработки поверхностных мягких и окрашенных вод, содержащих значительные количества ОВ, необходимо полное осветление коагуляцией-флокуляцией с отстаиванием (например, воды первичных массивов гранитных территорий). Технологическая линия обработки (рис 32) представляет собой вариант вышеупомянутой линии (см. п. 2.2.2.3) с использованием хлора и материалов, содержащих марганец.



2.2.2.6. Окисление озоном

Окисление иона марганца Mn^{2+} озоном происходит быстро и в соответствии со следующей реакцией:



Для окисления одного грамма Mn^{2+} требуется 0,9 г озона. Вводимой дозы озона должно хватать только на окисление Mn^{2+} до MnO_2 и не должно быть избытка озона (опасность появления розового цвета), см. гл. 17, п. 4.

Показанная на рис. 33 установка в Жоншэ (Франция) основана именно на этом принципе.



Когда марганец находится в виде комплексов с ОВ, необходимо полное осветление с коагуляцией-флокуляцией и отстаиванием, озон нельзя использовать как преокислитель для окисления марганца. Дело в том, что озон окисляет марганец только после разрушения органомарганцевых комплексов. Это влечет за собой, с одной стороны, увеличенное и неэкономное потребление озона, а с другой — стабилизацию коллоидов (затрудняющую коагуляцию и флокуляцию). В этом случае марганец может быть удален двумя способами, либо применением $KMnO_4$ перед отстаиванием, как показано на рис. 32, либо озонированием отстаивной воды, при этом осадок MnO_2 задерживается на фильтрах.

2.2.3. Биологическое удаление марганца — способ Mangazur

2.2.3.1. Принцип

Как и для железа, многие бактерии (см. гл. 2, п. 1.8) в аэробной среде создают возможность для биологического окисления марганца кислородом.

Некоторые бактерии обеспечивают окисление двухвалентного марганца Mn^{2+} косвенно, оно происходит благодаря увеличению значения pH, связанному с ростом этих бактерий, что делает возможным достаточно быстрое окисление Mn^{2+} кислородом. В случае других бактерий окисление связано с активностью внутриклеточных ферментов. Наконец, для третьих окисление начинается с адсорбции растворенного марганца на поверхности клеточной мембраны с последующим его разложением ферментами. Марганец в этом случае концентрируется в оболочке, окружающей клетку или группу клеток.

Бактерии требуют для своего развития слабощелочной среды ($pH \geq 7,5$), окислительно-восстановительный потенциал которой должен превышать 400 мВ, что соответствует воде, близкой к насыщению растворенным кислородом [см. рис. 28, область (2) биологической деманганизации]. Но если этот потенциал сильно снижается, то некоторые из этих бактерий способны растворять в воде марганец, который они перед этим аккумулировали (переход $MnO_2 \rightarrow Mn^{2+}$).

Также в присутствии легко усваиваемых ОР бактерии, связанные с углеродом, могут конкурировать с бактериями, связанными с марганцем, в потреблении растворенного кислорода, что может выразиться в понижении окислительно-восстановительного потенциала и выделении иона Mn^{2+} в раствор, например, во время остановок сооружения.

2.2.3.2. Преимущества биологической деманганизации

■ Реагенты

При нормальном функционировании установок реагенты не используются. Иногда (в пусковой период) полезно применять окислители, в основном перманганат калия.

■ Аэрация

При обработке большинства вод время контакта невелико. Оно требуется для увеличения окислительно-восстановительного потенциала. Аэрация может осуществляться в трубопроводах (под давлением) или с использованием каскада (гравитационно).

■ Скорость фильтрации

Прочность биологических хлопьев, по сравнению с физико-химической деманганизацией, позволяет, как и в случае биологической деферризации, повысить скорость фильтрации, которая может достигать в отдельных случаях до 30–40 м/ч на фильтрующих материалах, эффективный размер частиц которых превышает 1,35 мм.

■ Задерживающая способность

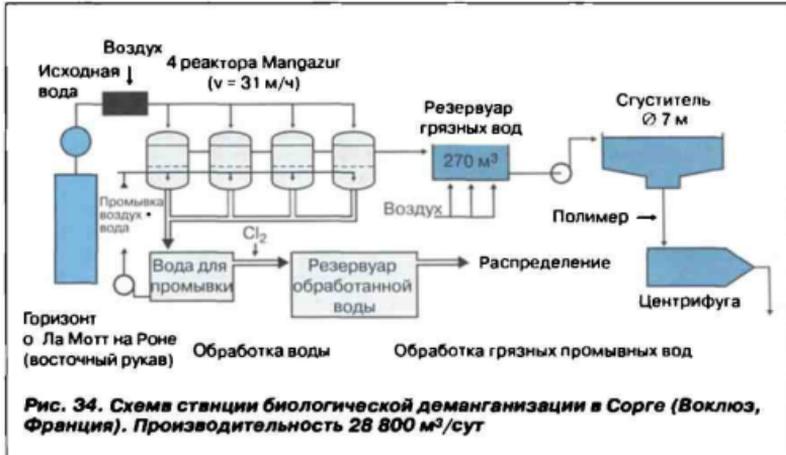
В 5–10 раз больше, чем при использовании физико-химического способа.

■ Промывка

Может осуществляться исходной водой (или обработанной хлорированной водой).

■ Осадки

Легко сгущаются и обезвоживаются.



2.2.3.3. Реализация

Процесс деманганизации осуществляется в биологическом реакторе-фильтре **Mangazur**. Чаще всего (кроме повышенного расхода) используется установка, работающая под давлением (рис. 34 и фото 18)



Фото 18. Вид реакторов Mangazur биологической деманганизации в Вудстоке (Канада). Производительность 6600 $\text{м}^3/\text{сут}$

Развитие бактерий, используемых для биологического удаления марганца, происходит медленнее, чем бактерий, удаляющих железо. Следовательно, естественный запуск установки еще более замедляется и может потребовать от 1 до 3 мес (это, впрочем, и является причиной того, что возможность такого процесса была обнаружена с опозданием, при анализе работы некоторых существующих станций).

Можно сократить указанный срок, используя песок, предварительно заселенный бактериями на другой подобной установке

2.2.3.4. Воды, содержащие железо и марганец

Если вода содержит одновременно железо и марганец, возникает необходимость соблюдения условий их окисления биологическим путем (окислительно-восстановительный потенциал), которые для этих двух элементов различны (см. рис 28) Кроме того, удаление марганца не может начаться, пока не закончено удаление железа В очень редких случаях наблюдается их одновременное удаление на одном фильтре, но только тогда, когда характеристики исходной воды очень благоприятны и за счет ограничений в скорости. В качестве примера можно привести гравитационную станцию в Понсэ, возле Дижона (фото 19), которая работает при нормальной производительности 3000 м³/ч по технологии экономной азрации и одноступенчатой фильтрации на шести фильтрах из песка со скоростью 15 м/ч в среднем и 19 м/ч максимум на исходной воде со следующими характеристиками

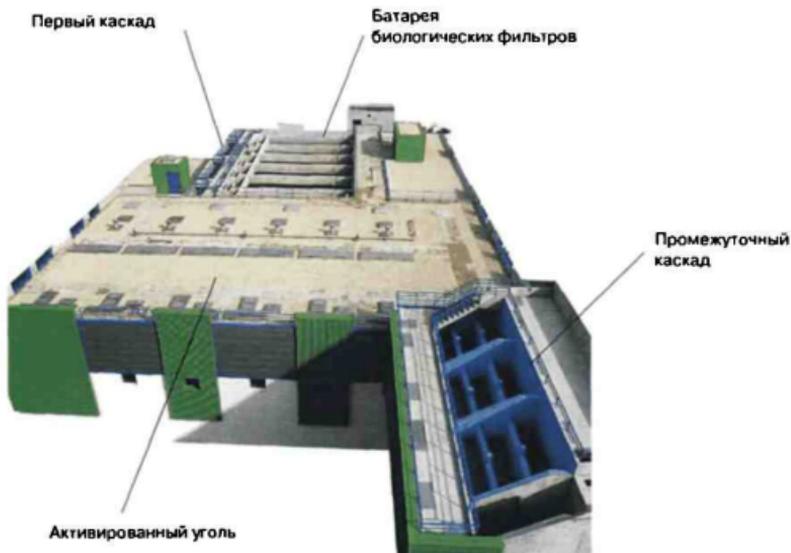


Фото 19. Гравитационная станция деферризации и деманганации с последующей обработкой активированным углем в Понсэ (Дижон, Франция). Производительность 72 000 м³/сут

- железо — 0,2–1 мг/л,
- марганец — 0,2–0,5 мг/л,
- pH — 7–7,2,
- NH₄ — следы до 0,1 мг/л

Такое решение могло быть принято только после длительных испытаний на пилотной установке (более 6 мес). В большинстве других случаев используют следующую схему, основанную на **двух последовательных ступенях** фильтрации.

- первая азрация, отрегулированная для биологической деферризации,
- первая фильтрация (биологическая деферризация),
- вторая азрация и/или увеличение уровня pH (в зависимости от характеристик исходной воды и настроек первой стадии),
- вторая фильтрация (биологическая деманганизация).

В зависимости от местных условий станция может включать:

- две напорные ступени (см. пример на фото 20);
- две гравитационные ступени (для больших станций), расположенных по высоте так, чтобы вода проходила самотеком от первой ко второй,
- смешанное (комбинированное) решение (рис. 35). Биологическая деферризация реализуется под давлением, тогда как биологическая деманганизация — гравитационная. Введение перманганата осуществляется на каскаде при запуске установки в ожидании начального развития микроорганизмов, которое затем становится очень быстрым и позволяет доводить продолжительность циклов фильтрации на втором этапе от 24 ч в среднем (физико-химический способ) до 1–2 нед (биологический способ)

Несмотря на необходимость применения, как правило, двух этапов фильтрации, если вода содержит одновременно железо и марганец, биологическое решение остается более экономичным, чем физико-химическая обработка, и всегда более



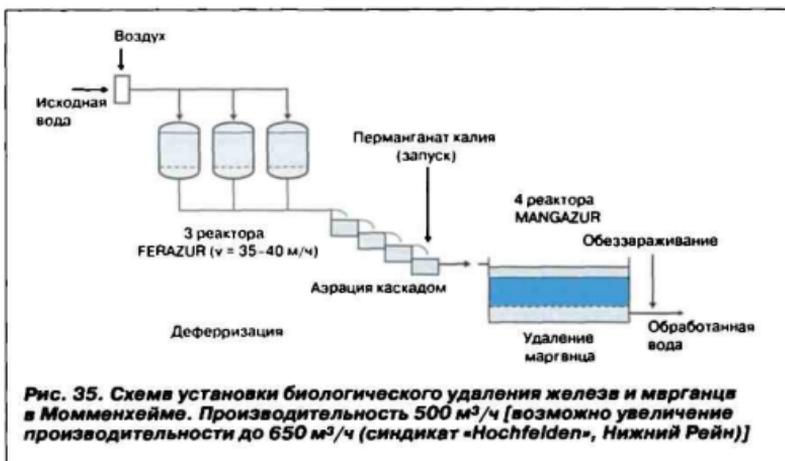
Азрация
исходной
воды

2 реактора
Ferazur
(30 м³/ч)

Азрация
деферризованной
воды

3 реактора
Mangazur
(20 м³/ч)

Фото 20. Две ступени напорной биологической деферризации и деманганизации. Производительность 4400 м³/сут (синдикат «Basse Meuse», Франция)



легким в эксплуатации. Однако насколько биологическая деферризация теперь уже хорошо управляема (точный анализ позволяет делать надежные проекты), настолько биологическая деманганизация из-за необходимых высоких значений pH и особенно окислительно-восстановительного потенциала подвержена побочным влияниям (NH_4 , H_2S , ОВ и воды с низким значением pH и др.), что требует проведения предварительных пилотных испытаний.

2.3. Удаление аммония

Аммоний, присутствующий в воде, может быть удален как физико-химическими, так и биологическими методами.

2.3.1. Физико-химические способы

В гл. 3, п. 12.4.2.1, было показано действие хлора на аммоний. Последний удаляется, как только доза хлора превосходит критическую точку. При этом часто появляются побочные продукты (хлорорганические соединения, тригалогенметаны и др.), присутствие которых нежелательно (см. гл. 2, п. 2.8.2). Эта технология применима только в том случае, когда количество веществ-предшественников, присутствующих в воде, очень мало, а именно

- для вод с низким содержанием ОВ;
- в конце технологической линии обработки, т. е. на уже осветленной и очищенной воде. Это особенно касается случая, когда необходимо компенсировать недостаточность биологической обработки удаления аммония (например, в периоды холодной воды). Так, например, станция «Morsang-sur-Seine» (см. п. 1.5.3, рис. 9) снабжена в конце технологической линии резервуаром доочищенной воды с поршневым потоком.

Другие окислители (озон, ClO_2 , хлорамин, KMnO_4) неэффективны для удаления аммония.

Ионный обмен клиноптилолит (природный цеолит) иногда предлагается для удаления NH_4 , но его применение является дорогостоящим.

2.3.2. Биологическое удаление аммония (нитрификация)

2.3.2.1. Условия реализации

Условия развития бактерий, биологически окисляющих аммоний в нитрит и затем в нитрат, уточняются в гл. 2, п. 1.5, и в гл. 4, пп. 2.1.3 и 6.5.1

Если концентрация NH_4 в исходной воде относительно невелика, нитрификация в производстве питьевой воды осуществляется, как правило, на фильтрах (фиксированные культуры) либо с загрузкой гранулированными материалами, которые благоприятны для закрепления на них бактерий (материал **Biolite**), либо на фильтрах с песком и/или ГАУ, необходимых к тому же для обработки воды.

Кроме того, дополнительно необходимо обеспечить

- достаточное количество кислорода,
- добавление (или присутствие) фосфора для усиления роста бактерий;
- достаточную концентрацию гидрогенокарбонатов (титр ТАС): бактерии являются автотрофными и получают из них необходимый для своего развития углерод,
- подходящую величину pH ($> 7,5$),
- достаточно высокую температуру, ниже $8-10^\circ\text{C}$ метаболизм бактерий быстро уменьшается и окисление аммония крайне замедляется (с образованием нитритов) и даже полностью подавляется при температуре ниже $4-5^\circ\text{C}$,
- полное отсутствие остаточных концентраций дезинфицирующих веществ.

Кроме того, необходимо предусмотреть время естественного обсеменения фильтрующей загрузки в течение 1–3 мес, чтобы процесс достиг максимальной эффективности

Применяемые технические средства различаются главным образом материалом-носителем, используемым для закрепления бактерий, направлением фильтрации обрабатываемой воды и наличием или отсутствием непрерывной подачи воздуха в реактор нитрификации.

Заметим, что в обработке питьевой воды ориентируются на ион аммония NH_4^+ , а не на N-NH_4 (аммонийный азот), как в случае очистки сточных вод (отношение $\text{N-NH}_4^+ = 1,28$).

2.3.2.2. Фильтр с загрузкой пуццоланом

Исторически фильтр с загрузкой пуццоланом был первым используемым для нитрификации техническим средством, но его применение предполагало тяжелые эксплуатационные ограничения, заключающиеся в том, что

- пуццолан (размер частиц больше 1 см) нельзя промывать ни водой, ни воздухом, вследствие чего нужно периодически останавливать фильтр и вымачивать загрузку в хлорированной воде,
- каждые 2–3 года пуццолан необходимо заменять

В результате от этого решения отказались и заменили его на способ **Nitrazur N**.

2.3.2.3. Фильтр с загрузкой Biolite

В гл. 4, п. 6.5.1, было показано влияние температуры на кинетику нитрификации (см. также п. 2.3.2.1).

Кроме того, известно, что для биологического окисления аммония на каждый грамм этого вещества требуется $3,25-3,6$ г O_2 .

а) Если количество кислорода, необходимое для нитрификации, присутствует в обрабатываемой воде, аэрация реактора не нужна. На практике.

- если $\text{NH}_4^+ < 1 \text{ мг/л}$, можно использовать один классический песчаный фильтр при условии хорошей предварительной аэрации воды,
- если $1 < \text{NH}_4^+ < 2 \text{ мг/л}$, применяют фильтрующий нитрифицирующий слой из материала **Biolite**, а кислород подают в воду во время предварительной аэрации с использованием либо каскада, либо пористых диффузоров. Этот вариант реализован на очереди станции -Mont Valérien- (п. 153, рис. 10), которая включает:
 - каскад аэрации,
 - предозонирование,
 - осветление в остойнике **Densadeg**,
 - фильтрацию/нитрификацию с нитрифицирующим слоем из материала **Biolite** с размером частиц 1,1 мм, высотой слоя загрузки 1 м, скоростью фильтрации $\approx 7 \text{ м/ч}$,
 - озонирование,
 - фильтрацию на ГАУ (двухпоточные фильтры **Biflux**)

б) Если концентрация NH_4^+ такова, что растворенного в воде кислорода недостаточно, необходимо применять **аэрируемый реактор**, например реактор **Nitrazur** (см. гл. 4, п. 6.5.1 и рис. 43), который существует в двух вариантах:

- **противоточные реакторы**, в которых вода циркулирует сверху вниз, а воздух — снизу вверх (см. рис. 36 и фото 21, станция в Лувесьенне),
- **прямоточные реакторы**, где вода и воздух циркулируют снизу вверх (например, станция в Охле, Индия)

Реакторы **Nitrazur** работают со скоростью около 10–15 м/ч и отношением объемов воздух–вода от 0,3 до 1

Выбор типа реактора определяется концентрацией подлежащего нитрификации NH_4^+ и, следовательно, требуемым количеством кислорода; действительно, расход воздуха, увеличенный по отношению к расходу воды, может привести к закупорке реактора с нисходящим потоком, но для сопоточных реакторов с восходящим потоком необходимо предусмотреть дополнительно фильтрацию, поскольку для этого типа реактора невозможно гарантировать достаточно низкий уровень мутности.

2.3.2.4. Фильтры с плавающим фильтрующим материалом

Реактор **Fitrazur** (см. гл. 13, п. 4.1) является интересной альтернативой предыдущим реакторам нитрификации

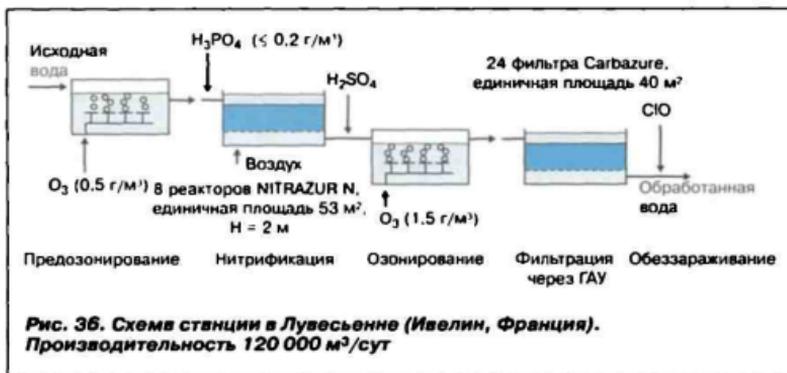




Фото 21. Реактор Nitrazur N. Фильтр площадью 53 м² в действии. Производительность 120 000 м³/сут (Лувьсьенн, Ивелин, для компании «Lyonnaise des Eaux», Франция)

Использование более легкого, чем вода, материала позволяет обеспечить фильтрацию снизу вверх и, если необходимо, восходящую циркуляцию воздуха.

Существуют как неазрируемый реактор *Filtrazur*, применяемый для концентрации NH_4^+ от 1 до 1,5 мг/л (Обсржанвиль, Франция), так и азрируемый реактор *Filtrazur*, используемый для больших концентраций (Канн-Цзу, Китай).

2.3.3. Биологическая обработка воды, содержащей аммоний, железо и/или марганец

Диаграмма стабильности (рис. 37) показывает последовательность обработки воды при наличии в ней аммония, железа и марганца. Как легко заметить, железо можно удалить биологическим путем без нитрификации, а марганец — нет.

Кроме того, режимы биологической деферризации (повышенная скорость, малое время пребывания, ограничение по содержанию растворенного кислорода) противоположны условиям, необходимым для нитрификации, которая поэтому часто проводится на более поздней стадии в зависимости от содержания NH_4^+ и температуры воды. Тогда биологическая деманганнизация может



Рис. 37. Последовательность стадий обработки воды, содержащей одновременно Fe^{2+} , NH_4^+ и Mn^{2+}

происходить в том же реакторе, если нитрификация заканчивается до выхода обработанной воды

В зависимости от соответствующих концентраций трех элементов и других характеристик воды возможны различные комбинации, например

- низкое содержание Fe, Mn, NH_4^+ : физико-химическая деферризация, нитрификация и биологическая деманганизация на одном фильтре,
- среднее или высокое содержание Fe и низкое Mn, $\text{NH}_4^+ < 1,5$ мг/л биологическая деферризация, затем интенсивная аэрация и фильтрация на песке или фильтрующем нитрифицирующем слое в зависимости от точного содержания NH_4^+ и температуры воды,
- среднее или высокое содержание Fe и Mn, $\text{NH}_4^+ > 1,5$ мг/л в этом случае нужна трехступенчатая технологическая линия, включающая
 - биологическую деферризацию,
 - нитрификацию в реакторе **Nitrazur N**,
 - окончательную фильтрацию, в процессе которой одновременно завершаются биологическая нитрификация и деманганизация

Примечание В случае содержащей ВВ поверхностной воды, которая требует полной обработки осветлением, включая глубокую доочистку, можно осуществлять определенную нитрификацию на некоторых стадиях обработки, например в накопителе исходной воды, в слое осадка отстойников, на песчаных фильтрах на фильтрах с ГАУ

2.4. Удаление нитратов

Удаление нитратов может осуществляться как физико-химическим, так и биологическим путем

2.4.1. Физико-химические процессы — способ *Azurion*

Удаление нитратов осуществляется такими методами, как обратный осмос, электродиализ и ионный обмен

Ни обратный осмос (см гл 15), ни электродиализ (см гл 3, п 9.5.3) не разрабатывались специально для удаления иона NO_3^- , и потому они используются, только если одновременно необходимо обеспечить обессоливание (солонатовая вода)

Способ **денитратации** (удаление нитратов) с помощью ионного обмена и ионитов, применимых для производства питьевой воды, был одобрен во многих странах. Поэтому, прежде чем разрабатывать проект, важно ознакомиться с законодательством соответствующей страны

2.4.1.1. Общие условия использования ионообменников

При использовании ионообменников следует учитывать многие параметры

— содержание ВВ в обрабатываемой воде должно быть менее 1 мг/л. В противном случае задержание ВВ вызывает существенное увеличение потерь напора, частые промывки и преждевременный износ смолы,

— ионный состав воды кроме ионов NO_3^- при ионном обмене задерживаются ионы SO_4^{2-} и часть ионов HCO_3^- , которые заменяются ионами Cl^- при регенерации ионообменной смолы хлоридом натрия. Из-за этого в обработанной воде может быть слишком высокая концентрация иона Cl^- . Использование в качестве обменного иона HCO_3^- может решить проблему, но это сложнее в осуществлении и дороже

Примечание 1 Отработанные регенерирующие растворы (элюаты) содержат все сульфаты и нитраты, присутствовавшие в исходной воде до ее обработки. часть ионов бикарбонатов и большее количество хлорида натрия, использованного в качестве регенерирующего раствора. Необходимо иметь водоотводящее устройство, позволяющее удалять эти элюаты

Примечание 2 Преимуществом ионного обмена является возможность обработки воды любой температуры

2.4.1.2. Реализация ионного обмена

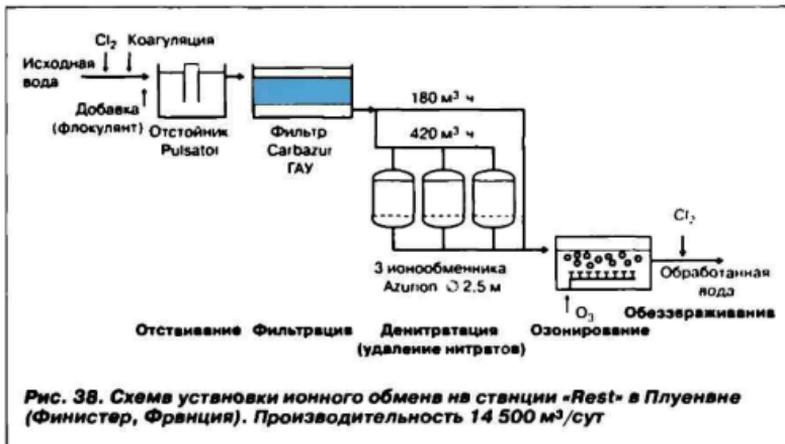
Пример использования способа денитратации **Azurion**, разработанного компанией «Дегремон», дает завод питьевой воды «Rest» в Плуенане, который обрабатывает поверхностную воду для эксплуатирующей компании в городке Л'Орн (Франция). Технологическая линия обработки показана на рис 38, а на фото 22 приведен другой вариант применения этой технологии.

Элюаты накапливаются во время сухого сезона в лагуне, откуда во время сезона дождей их можно сбросить в реку, где происходит их еще большее разбавление

Способ ионного обмена, применяемый на заводе «Rest», является, собственно говоря, технологией с противоточной регене-



Фото 22. Два из трех ионообменников **Azurion** диаметром 2,5 м установки «**Kernills**» (Финистер, Франция). Производительность 500 м³/ч



рацией отжатого слоя (блокировка воздухом); в более поздних установках используется способ регенерации восходящим потоком UFD компании «Дегремон» (см гл. 14, п. 1.3 2)

2.4.2. Биологические методы денитрификации

2.4.2.1. Общие условия использования

В биологических методах денитрификации применяются определенные виды бактерий. Проводились испытания по использованию **автотрофных бактерий**, рост которых становится возможным при наличии, к примеру, водорода или серо-содержащего носителя согласно реакции



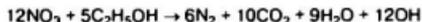
или



В последнем случае требуется CaCO_3 для нейтрализации порождаемой кислотности.

Результаты показали, что эти бактерии действуют медленно, т. е. скорости фильтрации очень невелики (0,5–2 м/ч). Поэтому такие методы малоприменимы в промышленном масштабе.

Применение **гетеротрофных бактерий** более распространено (см. также гл. 2, п. 1 5, и гл. 4, п. 6.5.2). Эти бактерии получают энергию в результате разложения углеродсодержащих питательных веществ, главным образом этанола, согласно общей реакции



Основные характеристики этого процесса

- превращение нитратов в газообразный азот;
- осадки (избыточная биомасса) могут обрабатываться после смешивания с осадками городских сточных вод;
- малое влияние на кальций-углеродное равновесие воды;
- зависимость от температуры. Процесс трудноосуществим, если температура падает ниже 7–8 °С;
- чувствительность к присутствию растворенного в исходной воде кислорода (бактерии потребляют свободный кислород раньше, чем связанный в нитратах, из-за чего происходит более значительное потребление углеродсодержащих питательных веществ);
- начальный запуск требует около месяца.

2.4.2.2. Реализация — способ Nitrazur DN

Способ **Nitrazur DN** схематически показан на рис. 39

Реактор **Nitrazur DN** (см. также гл. 4, п. 6 5 2) работает в режиме восходящего потока, когда обрабатываемая вода с выделяющимся азотом движется в одном направлении, что позволяет избежать неудобств, вызванных закупоркой пор загрузки газовыми пузырьками. Обычные скорости составляют порядка 6–10 м/ч для высоты загрузки из материала **Biolite 3**.

Кроме углеродсодержащих питательных веществ требуется вводить фосфор (около 0,5 г PO_4^{3-} для удаления 100 г нитратов), необходимый для развития бактерий. Оптимальная величина pH составляет порядка 7,5.

Активированный уголь кроме своего фильтрующего действия обеспечивает сорбцию загрязнений, что позволяет удалить остаточные углеродсодержащие пита-



тельные вещества, а также следы пестицидов, часто присутствующих в воде вместе с нитратами (прежде всего, когда загрязнения имеют сельскохозяйственное происхождение) Промежуточная аэрация может также быть заменена или дополнена обработкой озоном

Процесс обработки регулируется по определенному остаточному содержанию нитратов, это позволяет ограничить стоимость обработки и общее потребление вводимых углеродсодержащих питательных веществ

Реактор промывается нехлорированной водой Введение жавелевой воды для обеззараживания осуществляется во второй резервуар хранения обработанной воды

2.4.3. Сравнение преимуществ двух способов удаления нитратов

Из табл. 9 следует, что, хотя и не в обязательном порядке, наиболее часто используют:

- для подземных вод — способ Nitrazur,
- в конце технологической линии обработки поверхностных вод, прежде всего в холодном и даже умеренном климате, — способ Azurion.

2.5. Удаление H_2S

Возможны три основных способа.

Таблица 9
Сравнение двух способов удаления нитратов

Показатели	Биологическая денитрификация, способ Nitrazur DN	Денитрификация ионным обменом, способ Azurion
Капиталовложения	–	Менее высокие
Эксплуатационные затраты	Одного порядка. Требуется предварительные исследования в каждом отдельном случае (содержание солей, концентрация)	
Элюаты	Отсутствуют, но присутствуют биологические осадки, и NO_3 превращается в N_2	Элюаты с большим содержанием солей, ионы NO_3 лишь перемещаются
Кальций-углеродное равновесие	Мало влияет	Сильно влияет (делает воду более агрессивной)
Автоматизация	Более сложная	Легко реализуемая
Содержание солей в исходной воде	Мало влияет	Невозможность использования при высоком содержании хлоридов и сульфатов в воде
Содержание ВВ в исходной воде	–	Высокая чувствительность к содержанию ВВ в обрабатываемой воде
Температура	При слишком низкой обработка невозможна	Мало влияет
Эксплуатация	Необходимость более тщательного контроля (избегать частых пусков/остановок)	Очень стабильное функционирование (возможны частые пуски/остановки)

2.5.1. Физическое удаление отдувкой

Аэрация свободным воздухом (каскад, разбрызгивание) возможна только для очень малых концентраций H_2S , поскольку.

— степень удаления не достигает 100 % (кроме вод с очень кислыми значениями pH).

— выброс H_2S в атмосферу создает экологические проблемы (запах, токсичность) и заставляет проводить очистку отводимого газа хлорированной (жавелевой) водой или озоном (см. гл. 16, п. 2.6).

Форсированная аэрация в типовом реакторе для удаления углекислого газа CO_2 была бы более эффективна, но создавала бы те же проблемы для окружающей среды и часто требовала бы восстановления кальций-углеродного равновесия обработанной воды. Именно поэтому данный метод в обычной практике не применяется.

2.5.2. Химические технологии

2.5.2.1. Окисление

Химическое окисление эффективно, но трудно управляемо: в зависимости от условий обработки (pH, окислительно-восстановительный потенциал и др.) резуль-

Таблица 10
Потребность в окислителе, г на г H_2S

Используемый окислитель	Глубокое окисление H_2S (см уравнения в гл 3, п 1 2 4)	
	до S	до SO_4^{2-}
Cl_2	2,1	8,40
$KMnO_4$	3,1	12,40
O_3	1,4	5,65
H_2O_2	1,1	4,40

гатам окисления могут быть элементарная сера (коллоидная), сульфат-ион или промежуточные соединения. Теоретические стехиометрические соотношения приведены в табл. 10. На практике получается несколько продуктов окисления разного состава, и потребность воды в окислителе является промежуточной между соответствующими крайними значениями. Видно, что при увеличении начального содержания H_2S стоимость такой обработки быстро становится неприемлемой.

2.5.2.2. Осаждение солями железа

Используя сульфат железа II или хлорное железо, получают осадок сульфидов железа (FeS , FeS_2 , Fe_3S_4), являющихся коллоидами, которые надо, следовательно, подвергать коагуляции-флокуляции, а затем извлекать. Этот процесс, иногда используемый для сточных вод, плохо управляем при обработке питьевой воды.

2.5.3. Биологические технологии

В слабоаэрированной среде сульфобактерии, такие как *Beggiatoa* или *Thiothrix*, способны катализировать ферментативным путем окисление H_2S до элементарной серы (см гл. 2, п 1 7). Скорость реакции и развития микрофлоры фильтров такая же, как и в случае биологической деферризации (см п 2 1 3), концепция обработки, таким образом, остается без изменений (см рис. 29) введение воздуха в поток воды и фильтрация со скоростью от 10 до 20 м/ч.

Если в воде одновременно присутствует железо, оно может быть затем удалено биологическим путем в том же фильтрующем слое. Если вода содержит одновременно H_2S , Fe^{2+} , Mn^{2+} и NH_4^+ , можно предусмотреть две последовательные элементарные ступени обработки.

- биологическое удаление H_2S , затем Fe^{2+} — на первой ступени фильтрации после слабой азрации,
- биологическое удаление NH_4^+ , затем Mn^{2+} — на второй ступени фильтрации после интенсивной азрации.

2.5.4. Вывод

Биологический путь является намного более экономичным, но он еще полностью не исследован, и испытания остаются необходимыми во всех случаях, чтобы уточнить рабочие параметры и допустимую скорость фильтрации.

2.6. Фторирование и дефторирование

В отличие от хлора фтор, вообще говоря, добавляется в виде фторида, а не свободного фтора, тем не менее в России процесс называется фторированием. Во Франции же этот процесс называют фторидированием. По аналогии применяются термины «дефторирование» и «дефторидирование».

Обычно считается, что небольшое содержание фтора в питьевой воде (0,4–1 мг/л с учетом климата рассматриваемой страны) благоприятно для образования зубной эмали и защищает зубы от кариеса. Однако избыток фтора влечет разрушение эмали и вызывает нарушения эндемического (присущего данной местности) характера, известные под названием «флюороз» пороки развития зубов, пятна на эмали, потеря кальция, минерализация сухожилий, нарушения пищеварения и нервной системы. Эти поражения проявляются индивидуально при различных содержаниях фтора в воде. Нельзя использовать воду, если она содержит более 1–1,5 г/л F, в противном случае ее необходимо обрабатывать.

Таким образом, в зависимости от ситуации нужно предусмотреть либо искусственное введение в воду фтора (если он не вносится в других формах, например в виде зубной пасты), либо удаление этого элемента из воды.

2.6.1. Фторирование

Фторирование практикуется, прежде всего, в США. Можно использовать следующие вещества.

- гексафторсиликат натрия, чаще всего Na_2SiF_6 ,
- гексафторкремниевую кислоту H_2SiF_6 ;
- фторид натрия NaF

Такая обработка должна сопровождаться всеми необходимыми мерами предосторожности, касающимися защиты эксплуатирующего установку персонала и возможности случайной передозировки.

2.6.2. Удаление фтора

Иногда концентрация фтора в природных водах превосходит 10 мг/л. Ее нужно уменьшить до 1 мг/л (допустимое остаточное содержание тем меньше, чем выше средняя годовая температура); европейская норма фиксирует уровень 1,5 мг/л.

Используются следующие процессы

■ Фильтрация на активном глиноземе

Применяется чаще всего. Фиксация иона фтора обратима, и регенерация осуществляется сульфатом алюминия или предпочтительно содой и серной кислотой. Задерживающая способность может различаться в зависимости от начального содержания фтора, величины pH и общего содержания солей в воде, гранулометрии материала и условий проведения процесса. Обычно можно зафиксировать 0,3–4,5 г иона на литр адсорбента. Рекомендуется проводить предварительные лабораторные испытания, чтобы определить оптимальные условия и их влияние на состав обработанной воды.

■ Коагуляция-флокуляция

Обработка сульфатом алюминия является другим способом использования средства фтора гидроксиду алюминия, но потребность в коагулянте очень высока (50–150 г на грамм удаляемого F). Таким образом, эта операция может применять-

ся только к исходной воде, требующей отстаивания и не содержащей много фторидов

■ Умягчение воды известью

Этот метод используется при величине $\text{pH} > 10$ и при условии достаточного содержания магния, так как именно оксид магния (магнезия) адсорбирует фтор. Определено, что для удаления 1 мг/л фтора требуется около 50 мг/л магния

■ Использование трикальцийфосфата

Давно замечено сродство фтора и трикальцийфосфата, поскольку всегда находят значительное содержание фтора в натуральных фосфатах, таких как апатиты, фосфориты (2–5 %) и даже в костях.

Обычно используются.

- натуральные продукты, костяная зола (животный уголь) или костная мука,
- синтетический апатит, который можно получать в воде тщательно контролируемым смешиванием извести и фосфорной кислоты

■ Другие способы

Если ион фтора нужно удалить одновременно с избыточной минерализацией воды, имеет смысл воспользоваться технологией обратного осмоса

Можно также рассматривать электродиализ.

2.7. Удаление мышьяка

2.7.1. Общие положения

До 2000 г. европейская норма для питьевой воды составляла 50 мкг/л мышьяка, что в большинстве случаев достигалось в процессе осветления или декарбонатации. После изменения этой нормы (европейская директива 98/83/CE 1998 г.) максимальная допустимая величина содержания As стала равняться 10 мкг/л, что вызвало развитие более специфических средств (см п 2 7.2), особенно для обработки вод, которые раньше считались пригодными и не требовали никакой другой обработки

В каждом конкретном случае можно выбрать один из следующих процессов, которые при отсутствии неблагоприятных показаний требуют окисления As(III) до As(V) каким-либо окислителем (хлором, например):

- **коагуляция-флокуляция** при величине $\text{pH} < 7$, если возможно, все исследования показали, что соли железа лучше солей алюминия. В зависимости от начального содержания As и условий реакции доза может изменяться от 10 до 100 г FeCl_3 на 1 м^3 (в каждом случае необходимы испытания), в соответствии с используемой дозой линия обработки должна включать либо отстаивание, либо прямую фильтрацию на песчаном или двухслойном фильтре со временем контакта до нескольких минут.
- адсорбция на **активированном оксиде алюминия**, обычно регенерируемом с помощью гидроксида натрия и соляной кислоты (лучше это делать с помощью серной кислоты по причине взаимодействия с сульфат-ионами), возможна, но неэкономична;
- **декарбонатация** известью с осаждением магнезии, что требует величины pH порядка 11 и делает эту обработку трудной для широкого распространения,

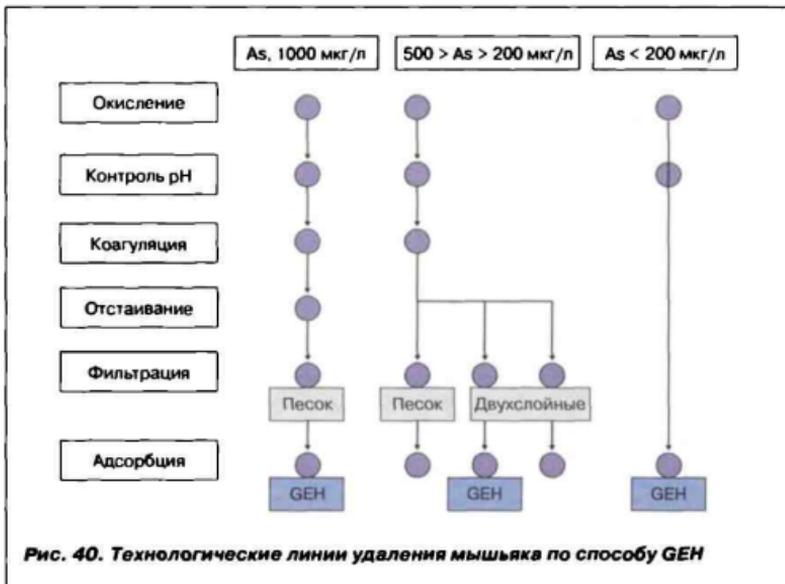


Рис. 40. Технологические линии удаления мышьяка по способу GEN

— **биологическая деферризация**, если обрабатываемая вода является подземной и содержит растворенное железо. Окисление бактериями, возможное также для As(III), делает бесполезным в этом случае предварительное химическое окисление, но требует обогащения исходной воды двухвалентным железом (введением FeSO_4), если отношение Fe/As недостаточно.

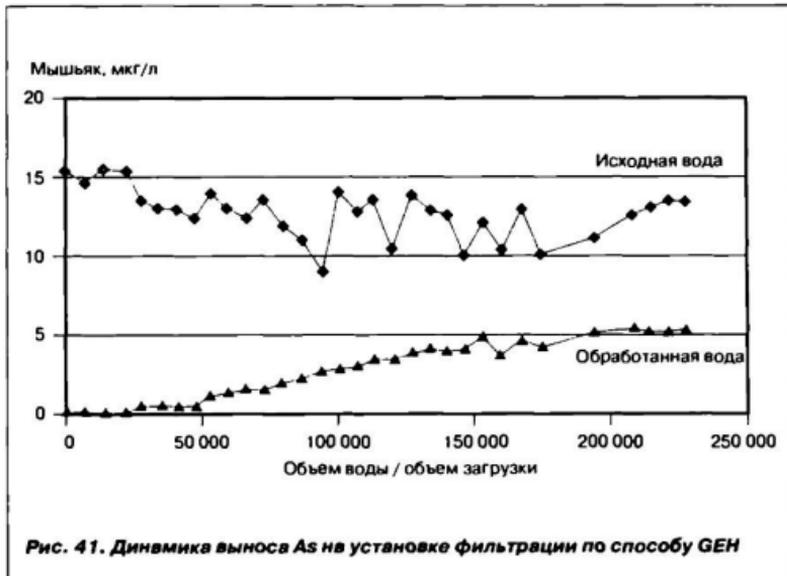
Среди других возможных процессов есть недостаточно эффективные (например, адсорбция на ПАУ и ГАУ) или не в полной мере предназначенные для этого (например, мембраны нанофильтрации или обратного осмоса), другие недостаточно проверены (например, фильтрация на оксиде железа или марганца), поскольку пока еще недостаточно отработана технология производства и применения гранулированного продукта на основе окисленного железа.

2.7.2. Способ GEN очистки подземных вод от мышьяка

В способе GEN в качестве фильтрующей загрузки используется материал GEN (от нем. *Granular Eisen Hydroxide*), который представляет собой оксигидроксид железа, способный адсорбировать большие количества As(V) без существенного изменения общего содержания солей в воде (Cl^- , SO_4^{2-} и др.). Компания «Дегремон» получила разрешение на его использование во Франции в обработке питьевой воды, так же как и разрешение на его внедрение.

С учетом характеристик воды и начальной концентрации мышьяка можно рассматривать различные технологические линии (рис. 40).

Большое значение имеет величина pH, и предпочтительно работать при значениях pH между 6,5 и 7,5 для максимизации сорбционной емкости между двумя перезагрузками.



В современных условиях загрузка фильтра по способу **GEN** не регенерируется, ее просто меняют каждые 1–3 года.

Преимущества этого способа заключаются в простоте его применения, поскольку предварительное окисление требуется не всегда, и в случае прямой адсорбции достаточно обеспечить разрыхление загрузки водой каждые 15 дней и отслеживать концентрацию мышьяка в обработанной воде; более того, увеличение выноса мышьяка происходит постепенно, что придает очень большую надежность процессу (рис 41)

В любом случае, чтобы определить оптимальные условия, желательно осуществить предварительное пилотное испытание.

2.8. Другие металлоиды (или неметаллы)

Европейский союз определил предельные значения для следующих элементов

- сурьма: 5 мкг/л,
- бор: 1 мг/л,
- бром: 10 мкг/л (в виде бромат-иона),
- селен: 10 мкг/л

2.8.1. Удаление сурьмы

Возможные процессы — коагуляция-флокуляция, фильтрация по способу **GEN** (см. п. 2.7.2) или обратный осмос. Эффективность очистки малоизучена, и предварительные испытания, безусловно, необходимы

2.8.2. Удаление бора

Обычная обработка осветлением неэффективна, если только не используется алюминат натрия (обеспечивает лишь частичное удаление). Другими возможными решениями являются

- фильтрация на ГАУ (тип которого должен быть выбран после испытаний, явления конкуренции бора с другими адсорбируемыми веществами оказывают большое влияние на частоту регенерации угля);
- фиксация на активированном оксиде алюминия или других оксидах металлов,
- декарбонатация известью с осаждением марганца,
- ионный обмен на специальной смоле (например, «Amberlit IRA 743» компании «Rohm & Haas»)

Удаление бора мембранами обратного осмоса, прежде всего, применимо в случае необходимости обессоливания морской воды (см. гл. 15, п. 4.2.3)

2.8.3. Бром: проблема броматов

Если содержание бромид-иона не регламентируется, то на концентрацию броматов (обычно не присутствующих в исходной воде, но образующихся прежде всего в процессе озонирования) введены ограничения ЕС и различными организациями (ВОЗ, USEPA).

Образовавшиеся броматы очень трудно удаляются, что требует дорогостоящих дополнений к схеме обработки (особый ГАУ, мембраны обратного осмоса или нанофильтрация и др.). Поэтому при озонировании питьевой воды необходимо принимать некоторые меры предосторожности:

- оптимизировать величину pH, поддерживая его ниже предельного значения порядка 7, когда потребность воды в озоне уменьшается,
- вводить небольшие количества иона аммония до обработки озоном ($0,05\text{--}2\text{ мг NH}_4^+/\text{л}$);
- оптимизировать работу реактора озонирования и способа введения озона в воду (использование математического моделирования динамики жидкостей и газов);
- оптимизировать процесс осветления, чтобы уменьшить потребность воды в озоне

Но **предварительное озонирование в обычных условиях не дает броматов**: оно даже благоприятно, когда исходная вода содержит много OBr^- из-за образования побочных продуктов (альдегиды, органические кислоты), которые частично ингибируют образование броматов во время основного озонирования.

2.8.4. Удаление селена

Коагуляция-флокуляция солями железа хорошо (до 80–90 %) удаляет селениты $[\text{Se}(\text{IV})]$ при величине pH = 6–7, но совершенно неэффективна для селенатов $[\text{Se}(\text{VI})]$, особенно в присутствии сульфат-ионов. Ионы трехвалентного железа могут влиять на результат, частично окисляя селениты до селенатов, поэтому интересно протестировать другие коагулянты, $\text{Al}(\text{III})$, $\text{Fe}(\text{II})$ и др.

Другими возможными видами обработки являются:

- декарбонатация известью [действие частичное, только на $\text{Se}(\text{IV})$];
- фиксация на активированном оксиде алюминия, на фильтре по способу GEN или на анионной ионообменной смоле;
- обратный осмос, нанофильтрация, электролиз

2.9. Удаление тяжелых металлов

2.9.1. Оценки различных технологических линий

Тяжелые металлы очень разнообразны, и степень их удаления на различных стадиях технологической линии изменяется от элемента к элементу

■ Влияние коагуляции-флокуляции и отстаивания

Коагуляция солями алюминия и железа хорошо удаляет серебро, хром (III) и олово, содержание свинца, ванадия и ртути понижается до 50–90 %, медь (в некоторых случаях), кадмий, цинк, никель и барий удаляются плохо. Содержание кобальта, молибдена и хрома (VI) совсем не уменьшается. Удовлетворительного удаления хрома (VI) можно добиться, восстанавливая его до хрома (III) сульфатом железа, с выпадением гидроксидов.

Обычно используемые дозы ПАУ (20 г/м^3) лишь незначительно влияют на удаление тяжелых металлов.

■ Влияние фильтрации на песке

Не обладая собственным воздействием на металлы, она удаляет только металлы, содержащиеся в хлопьях, проскоквивших из отстойника.

■ Влияние фильтрации на ГАУ

На второй стадии обработки фильтрация на ГАУ позволяет значительно уменьшить содержание нежелательных или токсичных ионов. Серебро и ртуть полностью удаляются, содержание свинца, меди и др. (за исключением никеля) после обработки не превышает допустимого уровня.

■ Влияние предварительного хлорирования

В сочетании с коагуляцией и отстаиванием, фильтрацией на песке и на ГАУ хлорирование улучшает удаление тяжелых металлов, особенно когда доза хлора немного превосходит дозу, соответствующую критической точке.

■ Влияние декарбонатации

Декарбонатация известью, даже частичная, сопровождается заметным уменьшением содержания большинства тяжелых металлов [за исключением Cr(VI) и органической ртути].

2.9.2. Особый случай применения европейских норм

В табл. 11 приведены данные об эффективности основных процессов удаления металлов, упоминаемых во французском правительственном Постановлении № 2001/1220.

Удалению никеля способствует осветление после предварительного хлорирования и в присутствии ПАУ. Что касается трех металлов (Ba, Cd и Ni), наиболее трудных для удаления в классических линиях обработки, то можно предложить одну из следующих дополнительных стадий.

Таблица 11
Эффективность удаления металлов
(согласно Декрету Франции № 2001/1220)

Металл (параметрическое значение, мгк/л)	Полное освещение	Освещение + доочистка на ГАУ	Мембраны обратного осмоса или нанофильтрации
Барий (700)	До + ¹	++	+++
Кадмий (5)	+	++	+++
Хром {Cr(III)	+++	+++	+++
(50) {Cr(VI)	-	+++	+++
Медь (1000) ²	До ++	+++	+++
Ртуть (1)	++	+++	++ ³
Никель (20)	-	+	+++
Свинец (10)	++	+++	+++

Степень удаления
 - 0–20 %, + 20–50 %, ++ 50–80 %, +++ 80–100 %.

¹ С коагуляцией сульфатом алюминия или железа, в некоторых случаях в присутствии порошка гипса
² Выход со станции (2000 мгк/л на выходе из крана потребителя)
³ Очень эффективно, если ртуть ионизирована может быть хуже, если она задерживается в форме органических соединений ртути

- декарбонатация известью (каталитическая при величине pH = 9,5 или классическая при pH = 10–11);
- катионная ионообменная смола

2.9.3. Проблема удаления свинца

Выше отмечено (см. табл. 11), что удаление свинца не представляет трудностей, но фактически он редко присутствует в исходной воде. Свинец попадает в воду чаще всего в процессе ее распределения (см. описание коррозии в гл. 7, п. 4.6), когда сеть состоит из свинцовых трубопроводов или из свинца выполнены сварные швы (припой), главным образом это относится к ответвлениям и внутренним сетям.

Нормы во Франции имеют прогрессивный характер:

- до 25 декабря 2013 г. — 25 мгк/л, этот предел может соблюдаться соответствующей обработкой воды:
 - введением пленкообразующего вещества (предназначенного для формирования защитного покрытия гидроксифосфата свинца): фосфорная кислота, ортофосфат и/или полифосфат натрия или цинка;
 - реминерализацией и нейтрализацией очень мягких и кислых вод;
 - частичным умягчением (декарбонатацией) известью или гидроксидом натрия вод, содержащих много бикарбоната кальция;
 - нанофильтрацией;
- с 25 декабря 2013 г. — 10 мгк/л; никакие распределительные сети не должны будут после этой даты содержать элементы свинца или такие материалы, как оцинкованная сталь, латунь и др. Кроме простой замены материалов трубопроводов возможны и другие решения: интубирование (например, полиэтиленом), нанесение покрытий (эпоксидная смола, латекс и др.)

2.10. Радиоактивность

Выбор обработки зависит от присутствующих радионуклидов и проблемы отходов осадков из отстойников, фильтрующие материалы

Обработка коагуляцией-флокуляцией хорошо удаляет радиоактивность, связанную с коллоидами

Декарбонатация известью дает хорошую степень удаления радия и урана

Фильтрация на активированном угле удаляет некоторые радиоактивные элементы, такие как уран, кобальт, хром, йод, вольфрам и др

Фильтрация на некоторых специальных материалах, обогащенных оксидами марганца (например, марганцевый зеленый песок), также может давать хорошие результаты, особенно по радю (в каждом случае необходимы испытания)

Обработка на мембране обессоливания позволяет эффективно удалить все растворенные радионуклиды (включая частично растворимые нуклиды Cl^-), однако радон и тритий совершенно не задерживаются.

Удалить радон можно только аэрацией

Тритий (норма 100 Бк/л) нельзя удалить никакой обычной обработкой воды, но его содержание в природных водах практически никогда не достигает этого уровня

2.11. Извлечение солей

Напомним, что избыточное соледержание (морская или солоноватая вода) может быть устранено только с помощью мембранной технологии обратного осмоса или электродиализа (см гл 15) и/или дистилляцией (см гл 16)

Если требуется решить проблему двухвалентных ионов (или ионов более высокой валентности), подойдет нанофильтрация, например.

— **умягчение:** нанофильтрация используется много лет в некоторых районах США (особенно во Флориде) для снижения содержания Ca^{2+} и Mg^{2+} .

— **сульфаты** (например, воды, загрязненные гипсовыми сбросами, некоторые водоотливы рудников) степень удаления ионов SO_4^{2-} мембранами нанофильтрации в основном между 90 и 98 %

2.12. Удаление органических веществ

Например, для некоторых подземных вод возникает только одна проблема — удаление ОВ. Она же может преобладать в обработке поверхностных вод. Принимаемая технология может быть весьма разнообразной, в зависимости от природы этих ОВ

2.12.1. Природные органические вещества — цветность

Гуминовые и фульвовые кислоты (часть которых придает воде цветность) достаточно эффективно удаляются коагуляцией-флокуляцией. Однако потребность в коагулянте может быть повышенной из-за этого прямой фильтрацией удаляются только 10–30 % этих кислот, тогда как в технологической линии полного осветления с оптимизированной коагуляцией и, в случае необходимости, с совместным использованием ПАУ в отстойнике уменьшение их содержания может меняться от 50 до 80 %. В этих оптимальных условиях молекулы, обуславливающие цветность, в основном полностью удаляются. В некоторых случаях очень строгие требования делают необходимой окончательную доочистку с использованием O_3 и ГАУ, прежде всего в случаях, когда после осветления имеет место остаточная цветность и/или

наличие предшественников тригалогенметанов и других побочных продуктов окисления (см. п 1 5)

2.12.2. Привкусы и запахи

Если исключить привкус, связанный с минерализацией воды, привкусы хлорфенола в результате плохо проведенного хлорирования и запах, вызванный остаточным хлором, неприятные привкусы и запахи чаще всего происходят либо от промышленных сбросов, либо от метаболизма водорослей, актиномицетов и бактерий (см гл. 6, п 3 1 2), в любом случае для определения путей устранения привкусов и запахов следует установить их происхождение, периодичность, природу (дегустация и определение запаха, газово-хроматографический и масс-спектрометрический анализ, когда это возможно) Роль различных стадий обработки можно обобщить следующим образом

■ Аэрация

Позволяет удалить неприятный запах, вызванный присутствием H_2S или некоторых летучих органических веществ (толуола, этилбензола).

■ Осветление

Осветление не оказывает заметного действия, но может, напротив, породить неприятные запахи (мертвые зоны, анаэробное во время остановок и др.), если гидравлика и эксплуатация не оптимизированы

■ Окисление

Озон является самым мощным окислителем для этих целей, но он эффективен только для некоторых веществ (например, фенолов, что позволяет избежать затем образования хлорфенолов во время хлорирования, некоторых метаболитов водорослей и др.); плохо управляемое озонирование также может дать характерные привкусы и запахи (цветочный, запах зелени и др.)

■ Активированный уголь

Может использоваться в виде порошка, если неприятный привкус появляется периодически и есть возможность определять его появление в необработанной воде. Если доза ПАУ в течение длительного времени превосходит среднее значение $15-20 \text{ г/м}^3$, более экономично выбрать фильтрацию на ГАУ, кроме станций, включающих осветление, сочетающееся с технологией **Cristal Etendu** (см. п. 1.7.3).

■ Комбинированная обработка озоном и активированным углем

Лучшая обработка для удаления привкусов и запахов. Она также позволяет уменьшить потребность в хлоре в сети распределения, а также конечную вводимую дозу Она осуществляется на большинстве современных станций.

Что касается специфики метаболитов водорослей, уточнения можно найти в п 1 8.2

2.12.3. Органические микрзагрязнения

Осветление не действует на большую часть органических микрзагрязнений (кроме детергентов, количество которых оно может уменьшать до 50 %); определяющей обработкой является доочистка воды: ПАУ, ГАУ, $O_3 + \text{ГАУ}$, **Cristal**, **Cristal Etendu** и др (см подробно в пп 1 5, 1.7 2 и 1.7.3).

2.12.4. Особый случай хлорированных растворителей

Если органическое загрязнение воды вызвано только летучими компонентами (например, трихлорэтиленом, тетрахлорэтиленом, хлороформом, тетрахлоридом углерода и др.) в значительных количествах, возможно удаление отдувкой воздухом (стрипаж). Это имеет место в некоторых подводных горизонтах. После отдувки летучих фракций окончательная обработка может обеспечиваться фильтрацией на активированном угле (рис. 42).



3. Изменение кальций-углеродного равновесия

Обработка в целях изменения кальций-углеродного равновесия касается всех вод (поверхностных или подземных), при необходимости в сочетании с более сложными технологическими линиями. Она предназначена

- либо для облегчения образования защитного карбонатного слоя Тильманса, предотвращающего коррозию чугунных или стальных трубопроводов, путем устранения агрессивного CO_2 и вывода величины pH на ее равновесное значение (**нейтрализация**). Если к тому же вода слишком мягкая, обработка также послужит для увеличения полного щелочного и кальциевого титров (ТАС и ТСа) (**реминерализация**);
- либо для уменьшения содержания в воде гидрокарбонатов (**декарбонатация**) и/или кальция (**умягчение**).

Принцип этой обработки рассматривается в гл. 3, п. 13

3.1. Нейтрализация и/или реминерализация

3.1.1. Нейтрализация агрессивной углекислоты

3.1.1.1. Физическое удаление CO₂

Возможны следующие виды обработки

- каскад $\Delta H = 1-2$ м, остаточное содержание равно 10–15 мг/л CO₂,
- разбрызгивание $\Delta H = 2-5$ м, остаточное содержание равно 5–10 мг/л CO₂,
- диффузионная аэрация, -средние- пузырьки G/L (расход воздуха / расход воды) = 1–2, остаточное содержание равно 10–15 мг/л CO₂,
- форсированная вентиляция в колонне насадкой (см удаление CO₂ в гл 16) соотношение объемов G/L = 10–100, остаточное содержание меньше 5 мг/л CO₂,
- отдувка в тонком слое G/L = 500–1000, остаточное содержание меньше 2 мг/л CO₂

Искомое остаточное содержание должно уравновесить полный щелочной титр ТАС и кальциевый титр ТСa воды

3.1.1.2. Нейтрализация химическим путем

Нейтрализация химическим путем чаще всего осуществляется введением известки, гидроксида или карбоната натрия, равновесные реакции подробно рассматривались в гл 3, п 13 3 В сложных технологических линиях применяется многократное последовательное введение реагентов на различных стадиях обработки. На станциях, включающих полное осветление с отстаиванием (или флотацией) и фильтрацией используют чаще всего известку, вводимую как минимум в двух точках

- для **регулирования величины pH флокуляции** (следует отметить, что в этом случае из-за присутствия ионов Ca²⁺ флокуляция проходит лучше, чем с использованием NaOH или Na₂CO₃), на этой стадии можно использовать **известковое молоко**,
- для **установления конечного значения pH** на уровне его равновесного значения pH₅, в этом случае можно использовать **сатуратор**, который поставляет **прозрачную известковую воду**, задерживая примеси известки (см также п 3 1 2 1), как вариант, можно применять NaOH

Нейтрализация агрессивного CO₂ может также осуществляться фильтрацией на нейтрализующем гранулированном материале на основе CaCO₃, согласно той же реакции и той же технологии, что и для реминерализации этим способом (см п 3 1 2 2)

3.1.2. Реминерализация

3.1.2.1. Реминерализация углекислым газом CO₂ и известью

Напомним осуществляемую реакцию



Исходя из этого уравнения, можно рассчитать, что для **увеличения минерализации (титров ТАС и ТСa) на 1 °F** (на один французский градус — см гл. 1, п 4) надо ввести 8,8 мг/л CO₂ и 7,4 мг/л чистой гидратированной известки (или 5,6 мг/л чистой негашеной известки)

■ Углекислый газ

Промышленный углекислый газ поставляется в баллонах под высоким давлением, но более распространено использование охлаждаемых контейнеров -низкого давления-.

В некоторых промышленных установках CO_2 может быть получен сжиганием газа (погружные горелки), но из-за загрязнений вследствие неполного сгорания и/или качества исходного топлива использование газа в производстве питьевой воды запрещено

При обессоливании морской воды CO_2 , получаемый во время ее дистилляции, может быть собран и использован для реминерализации питьевой воды (например, станция «Alba/Barheim», 43 000 м³/сут. показанная на рис. 43)

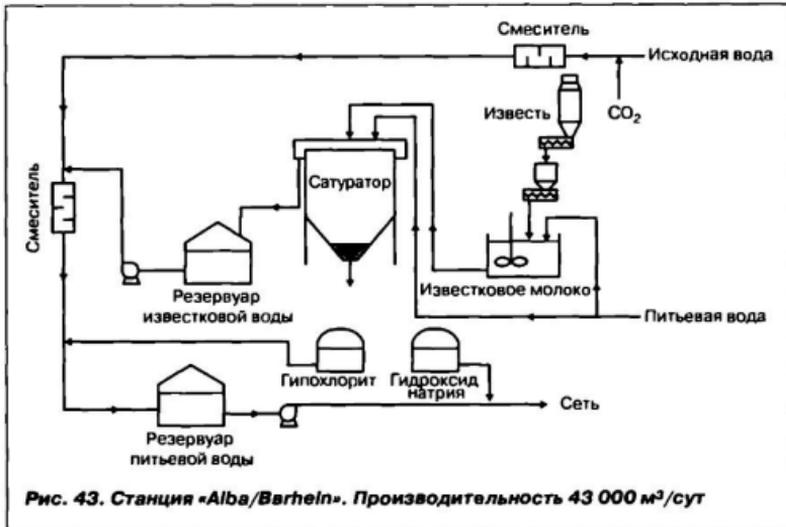
■ Известь

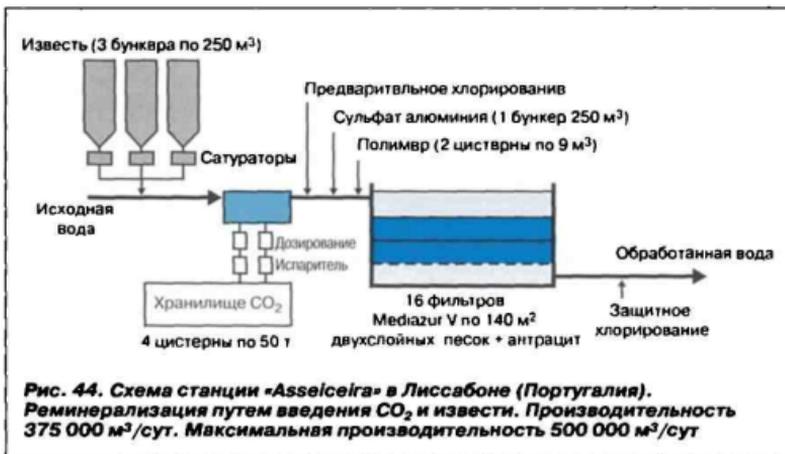
Чистота извести может меняться от 80 до 95 % в зависимости от ее происхождения; очевидно, это надо учитывать при расчете необходимых количеств и при выборе способа употребления продукта

Например, если надо увеличить жесткость воды на 8 °F с использованием «чистого» 90%-го продукта, вводят 59,2 мг/л чистой извести, т е около 65,8 мг/л коммерческой извести, что приведет к загрязнению воды на 6,6 мг/л по ВВ, если они не будут задержаны в сатураторе (см. далее)

■ Реализация

Приведем несколько вариантов реализации для разного качества исходной воды и используемых реагентов





— для дистиллированной воды, которой требуется только добавление солей, возможно введение CO₂ и насыщенной известковой воды с помощью смесителя в потоке воды и с доведением уровня pH до его равновесной величины pH₅ или даже несколько выше ее (см рис 43).

— для относительно чистой воды водохранилищ вслед за введением извести и CO₂ может быть предусмотрена простая контактная коагуляция на фильтре. Эта стадия фильтрации позволяет удалить коллоидные вещества и взвешенные частицы из исходной воды, так же как и некоторое количество влияющих на цветность ОВ. Схема подобной станции показана на рис 44;

— для вод, которые нуждаются в **полной обработке** осветлением, обычно используют реминерализацию в конце технологической линии обработки, т. е. после отстаивания и фильтрации, и, чтобы избежать ухудшения качества обработанной воды, прибегают к применению **сатураторов извести** (см. гл 20, п 4.3.2),

— совсем недавно было замечено, что флокуляция мягких вод ставит проблему регулирования величины pH. Действительно, небольшая буферная емкость этих вод редко позволяет поддерживать значение pH в оптимальной зоне действия коагулянта без добавления нейтрализующего реагента, поэтому предлагается проводить реминерализацию в начале технологической линии, перед коагуляцией, что дает следующие преимущества:

- значение pH более стабильно (за счет буферной емкости образовавшихся гидрокарбонатов),
- использование извести до основной обработки позволяет вводить ее в форме известкового молока, поскольку примеси этого продукта благоприятно скажутся на утяжелении хлопьев осадка на стадии осветления;
- сатуратор извести для окончательного регулирования величины pH известью по-прежнему необходим, но его размеры невелики,
- тщательное регулирование величины pH коагуляции обеспечивает оптимальное удаление ОВ и соблюдение нормы по остаточному содержанию коагулянта, находящегося в растворе (прежде всего, Al).

С другой стороны, некоторые процессы, проводимые после отстаивания воды, могут требовать более высоких значений pH (осаждение Mn, биологическая ни-

трификация NH_4^+ и др.). Поэтому необходимо обдумать вопрос о месте реминерализации в линии обработки воды: либо перед отстойником, либо между отстойником и фильтрами

Гибкое решение состоит в том, чтобы предусмотреть обе возможности, оставляя за оператором оптимальный выбор в зависимости от характеристик исходной воды, которые изменяются в разное время года. С учетом этого следует сохранять минимальную дозу CO_2 в начале линии обработки, чтобы иметь возможность регулировать величину pH, и предусмотреть точку введения и перемешивания реагентов (извести и CO_2) в отстоянную воду перед фильтрами для того, чтобы обеспечить эффективную корректировку значения pH в целях предотвращения перехода алюминия в растворенное состояние

■ Время контакта

Время контакта зависит от температуры воды и концентрации известкового молока или известковой воды (обычно оно составляет от 2 до 8 мин)

■ Управление процессом

Эффективность процесса «известь + CO_2 » зависит от большого числа параметров.

- качества исходной воды: величина pH, титр ТАС, содержание ОВ, температура,
- качества реагентов и/или концентрации маточных растворов,
- расходов растворов реагентов: стабильность дозирующих растворов.

Использование технологии реминерализации известью + CO_2 , таким образом, традиционно зарезервировано за **большими станциями обработки поверхностных вод**, на которых обязательно предусмотрено освещение и которые поэтому располагают соответствующей аппаратурой и персоналом

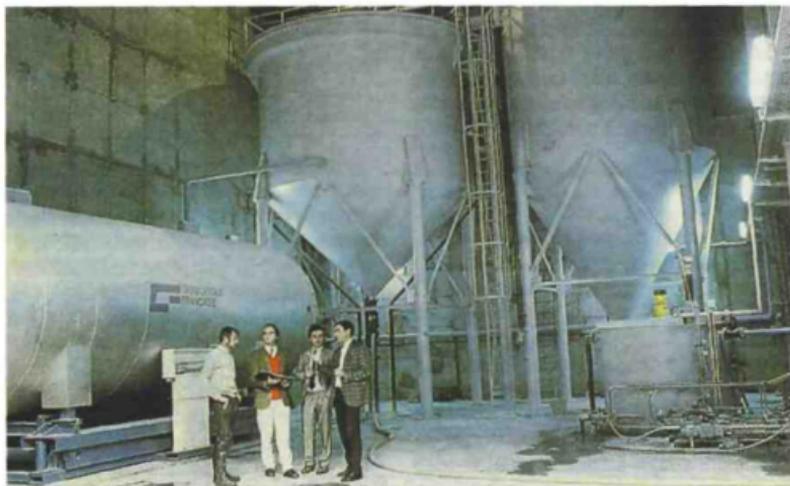
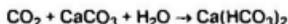


Фото 23. Цех реминерализации введением CO_2 и извести

3.1.2.2. Реминерализация CO_2 и известняком

■ Реакция

Теоретически реакция реминерализации выглядит следующим образом:



Чтобы увеличить титры ТАС и ТСа воды на 1 °F, нужно ввести 4,4 мг/л CO_2 и 10 мг/л CaCO_3

■ Реагенты

Карбонат кальция, обычно используемый во Франции, например литотамн (или известковый гравий), особенно хорошо подходит для реминерализации благодаря реакционной способности, связанной с физическим состоянием. Литотамн продается под различными коммерческими наименованиями, среди которых «Neutralite», «Neutralg», «Timalite» и т. п. Он состоит из останков водных ископаемых типа кораллового известняка (*Lithothamnium calcareum*), значительные месторождения которых существуют в Бретани.

Другие формы известняка, более или менее тонко измельченные, также пригодны к использованию, но при этом надо соответственно установить время контакта (см. ниже).

Химический состав литотамна относительно мало изменяется, основную часть составляет карбонат кальция, 5–10 % карбоната магния и некоторые примеси.

Реакция нейтрализации выглядит следующим образом



В зависимости от отношения содержания $\text{CaCO}_3/\text{MgCO}_3$ и процента чистоты коммерческого продукта **потребление известняка морского происхождения** может меняться от 2,2 до 2,4 кг на килограмм нейтрализуемого CO_2 .

Иногда предлагается использование продукта на основе более или менее кальцинированной (прокаленной) магнезии: смесь CaCO_3 , CaO , MgO . Он обладает большей реакционной способностью и поэтому требует меньшего времени контакта; однако присутствие свободных оснований может привести к значению рН, большому величине рН₅, и придать воде высокую способность к отложениям солей жесткости, особенно во время продолжительных остановок станции или при пониженной производительности по сравнению с нормальной. Следовательно, должно осуществляться точное регулирование.

■ Технология обработки

Из порошка карбоната кальция готовят суспензию, которую затем вводят в воду, содержащую подлежащий нейтрализации CO_2 . Но это целесообразно только для обработки поверхностных вод с использованием отстойника.

В данном случае особенно подходит отстойник со слоем взвешенного осадка, поскольку суспензия концентрируется в слое осадка, что позволяет увеличить время контакта (до 30–45 мин); кроме того, примеси карбоната способствуют утяжелению хлопьев осадка, что придает им лучшую отстаиваемость.

Обычно «морской известняк», поступающий в продажу чаще всего в **гранулах**, используется в **фильтрах-реакторах**, гравитационных или напорных, в которых вода просачивается через загрузку. Эффективность таких систем зависит

- от реакционной способности используемого продукта (пористость, плотность);
- от гранулометрии продукта;
- от температуры;
- от начального значения титра ТАС исходной воды;
- от времени контакта.

На рис. 45 приведен пример имеющихся в распоряжении графиков для определения размеров реакторов с гранулированным морским известняком (для размеров гранул в пределах 1–2 мм). График дает минимально необходимое время контакта для определенного количества CO_2 , подлежащего нейтрализации, в зависимости от качества исходной воды и искомой минерализации.

Результат выражается либо через время контакта (минуты), либо отношением часовых объемов (объем/объем в час). На практике из-за многочисленности параметров, которые нужно учитывать [температура, величина титра ТАС, способ контактирования, форма материала (порошок, гранулы и др.) и, прежде всего, допустимая величина остаточного CO_2], определить время контакта в каждом случае желательно экспериментально. Дело в том, что очень трудно добиться нулевого содержания

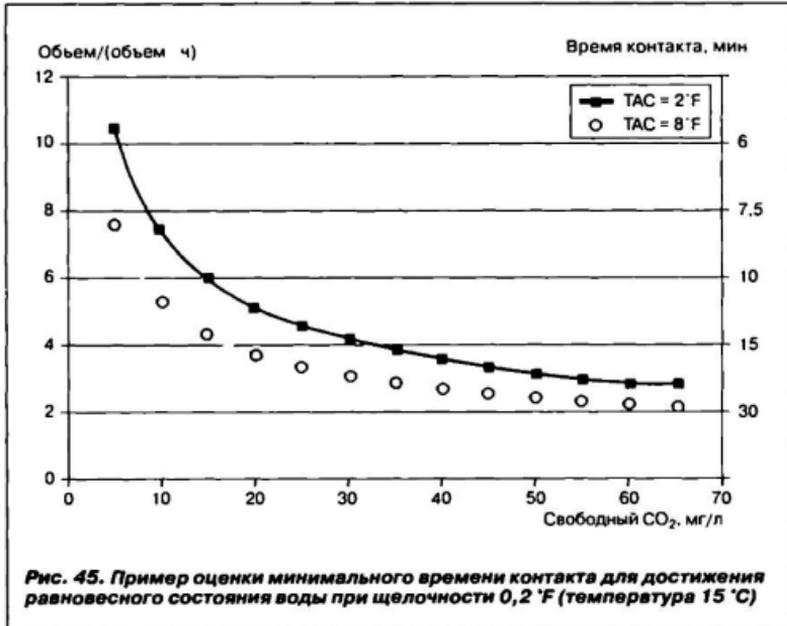
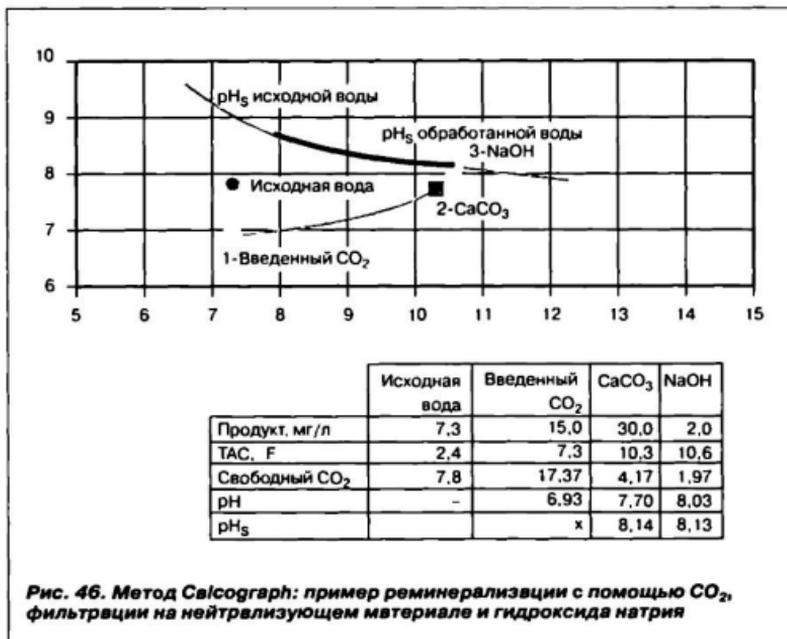


Рис. 45. Пример оценки минимального времени контакта для достижения равновесного состояния воды при щелочности 0,2 °F (температура 15 °C)

агрессивного остаточного CO_2 , если только не использовать бесконечное время контакта.

Известно, что на практике лучше всего иметь величину pH меньше равновесного значения pH_S на 0,1, хотя большая часть Технических заданий на проектирование требует, чтобы оно было превзойдено ($\text{pH} = \text{pH}_S + 0,1$ или 0,2). Поэтому вначале на выходе из фильтров обеспечивают величину pH меньше pH_S на 0,2 или 0,3 (следовательно, оставляя 1–2 мг/л агрессивного CO_2), а затем окончательно выходят на необходимое значение pH введением NaOH (конечная нейтрализация).



Изменение титра ТАС и значения pH воды можно проследить на графике (рис. 46), построенном по методу Calcograph (см. гл. 3, п. 13.3.4).

■ Потребление морского известняка: автономность/промывка

Используемый продукт с течением времени растворяется, в связи с чем происходит:

- уменьшение объема продукта и, как следствие, уменьшение времени контакта, что требует предусматривать **периодическую дозагрузку**, которую нужно рассчитывать в зависимости от количества нейтрализуемого CO_2 ;
- постепенное растворение гранул и, как следствие, образование мелких фракций, которые способствуют забиванию фильтрующего материала, что приводит к необходимости **регулярных и эффективных промывок** (воздух + вода).



Фото 24. Реминерализация путем введения CO_2 и фильтрации на загрузке Neutralite. Три фильтра по $28,5 \text{ м}^2$. Производительность $7200 \text{ м}^3/\text{сут}$ (станция обработки в Эпинале, Вогезы, Франция)

■ Дополнительная обработка: обеззараживание

Существление нейтрализации на известняке может сопровождаться ухудшением бактериологического качества производимой воды (пористые материалы легко заселяются микроорганизмами) Поэтому требуется:

- контролировать бактериологическое качество воды при ее поступлении и после хранения,
- осуществлять эффективные промывки с постоянной частотой независимо от потерь напора (по меньшей мере три раза в неделю),
- предусматривать обеззараживание на последующей стадии обработки воды;
- практиковать (по мере необходимости) введение хлора перед фильтром-нейтрализатором или во время промывки

■ Управление установками

Технология реминерализации « CO_2 + морской известняк» дает большие преимущества по сравнению со схемой « CO_2 + известь» она зависит только от дозирования CO_2 (не всегда необходимого), и не существует никакого риска передозировки, которая может привести к производству слишком жесткой воды. Следовательно, она особенно удобна для использования на малых станциях, питаемых водой из скважин, производительность которых часто меняется.

■ Пределы применимости технологии

Содержащиеся в воде скважин ионы растворенных металлов (Fe^{2+} , Mn^{2+}) могут выпадать в осадок при контакте с атмосферным воздухом и вследствие увеличения уровня pH. Образованные гидроксиды или оксиды забивают поры фильтрующего материала и задерживают его растворение

То же самое бывает с цветными водами, содержащими много гуминовых кислот последние могут выпадать в виде комплексов с металлами или солей кальция, вызывающих те же проблемы.

В этом случае перед реминерализацией должна проводиться предварительная обработка для удаления железа или марганца физико-химическим или биологическим путем (см. п. 2.1 и 2.2) или коагуляция гуминовых кислот солями железа как минимум с последующей фильтрацией через песок.

3.1.3. Потребление реагентов

В табл. 12 показано потребление различных реагентов, рассматриваемых как чистые продукты, и их действие при минерализации воды.

Таблица 12

Реагент – молярная масса	Потребление, грамм на грамм нейтрализованного CO_2	Увеличение титра ТН, °F на грамм CO_2	Увеличение титра ТАС, °F на грамм CO_2
Гашеная известь $\text{Ca}(\text{OH})_2$ – 74	0,84	0,113	0,113
Гидроксид натрия NaOH – 40	0,91	0	0,113
Na_2CO_3 – 106	2,41	0	0,227
CaCO_3 – 100	2,27	0,227	0,227
«Морской известняк» ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$)	2,2–2,4	0,227	0,227
«Магно» ($\text{CaCO}_3 + \text{MgO}$)	1,06	0,151	0,151

3.2. Декарбонатация и/или умягчение

В гл 3, пп. 2.1 и 11.3, описан процесс, позволяющий умягчать воды, дающие много накипи, методами химического осаждения (декарбонатация) или ионным обменом

3.2.1. Умягчение декарбонатацией

Если общая жесткость (титр ТН) воды велика и сопровождается повышенным полным щелочным титром ТАС, воду можно умягчить путем декарбонатации известью Она может осуществляться:

- «каталитическим» способом в реакторах **Gyrazug**, если нет необходимости проводить совместное осветление и если содержание магния невелико,
- отстаиванием в отстойнике **Densadeg** или любом другом аппарате с рециркулирующей осадка, тогда для осветления следует применять хлорное железо,
- разделением функций осветления и декарбонатации, если периодически возможно присутствие ингибиторов декарбонатации (рис. 47)



Поэтому в обработке питьевой воды.

- или подвергают полной декарбонатации только часть объема воды, а затем смешивают ее с оставшейся частью, осуществляя затем, в случае необходимости, осветление полного смешанного потока;
- или осуществляют лишь частичную декарбонатацию воды с одновременным осветлением. Именно это решение должно быть принято в случаях, когда желательно также удалить железо и марганец.

Если исходная вода содержит больше кальция, чем бикарбоната ($TCa \gg TAC$), необходимо предусматривать декарбонатацию гидроксидом натрия (вариант: известь + карбонат натрия).

Чтобы питьевая вода была приятной в употреблении, нужно вернуть ей некоторую часть титра TAC путем смешивания с частью воды, не подвергавшейся декарбонатации.

Два приведенных ниже примера иллюстрируют разнообразие возможных технологических линий обработки **поверхностных вод**.

На станции в Басс Винкель (Франция) используется отстойник **Densadeg** с последующей простой фильтрацией на песке с однородной гранулометрией (содержание ВВ на выходе из **Densadeg** всегда ниже 10 мг/л).

На станции в Ханнингфилде (см. рис. 47) обрабатывается вода водохранилища, которая кроме заметной концентрации микроводорослей, ОВ, пестицидов и др. имеет также очень высокую жесткость (24–42 °F). Обработка проводится в следующей последовательности: отстаивание, декарбонатация (известью), фильтрация, доочистка ($O_3 + GAU$). До модернизации декарбонатация полностью осуществлялась в установке **Accelator**. При расширении станции для частичного умягчения воды был выбран способ **Gyrazug** (см. гл. 10, п. 3.7). На рис. 47 показана схема обработки, которая включает

- предварительное озонирование ($0,5-2 \text{ г/м}^3$);
- введение коагулянта ($5-22 \text{ г FeCl}_3/\text{м}^3$) и флокулянта полимера ($0,05-0,2 \text{ г/м}^3$),
- отстаивание в отстойниках **Pulsator** с единичной площадью 1118 м^2 , в них, в частности, удаляются органические вещества, способные ингибировать декарбонатацию,
- введение извести ($80-130 \text{ г/м}^3$),
- каталитическая декарбонатация в восьми реакторах **Gyrazur** (см. гл 10, п 3 7, фото 24),
- введение H_2SO_4 ($0-20 \text{ г/м}^3$) для нейтрализации свободной остаточной щелочности,
- фильтрацию (16 двухслойных фильтров и 8 фильтров **Aquazur V**),
- окисление по технологии **Perozone** ($0-1 \text{ г H}_2\text{O}_2/\text{м}^3$ и $2-4 \text{ г O}_3/\text{м}^3$),
- фильтрацию на ГАУ (12 фильтров **Carbazur GH**),
- введение хлора (в форме хлорамина) и H_3PO_4 (для ограничения растворения свинца в сети распределения)

Для **подземных вод** решение должно приниматься отдельно в каждом конкретном случае, например

- на станции в Исль-Адам установка **Densadeg**, работающая в режиме декарбонатации, размещена перед биологической деферризацией, которая работает при остаточном давлении от установки **Densadeg**;
- в Вилленев-ля-Гаренн станция уже включала нитрификацию с последующей фильтрацией через песок, затем она была модернизирована добавлением стадии частичного умягчения фильтрованной воды в реакторе **Gyrazur** после введения известкового молока и в завершение стадии обработки небольшой дозой



Фото 25. Завод декарбонатации воды «Cassan» (регион Исль-Адам). Производительность $350 \text{ м}^3/\text{ч}$ с возможностью увеличения до $500 \text{ м}^3/\text{ч}$

FeCl_3 с последующей двухслойной фильтрацией, корректировкой величины pH серной кислотой, заключительным озонированием и хлорированием для защиты сети распределения,

— в Ратингене (Германия), напротив (см п 2 1 2 3, рис 27), реактор **Gyazur** расположен в начале технологической линии обработки для осуществления деферризации и деманганизации совместно с частичной декарбонатацией, затем вода азрируется, осветляется и нитрифицируется на двухслойных фильтрах.

3.2.2. Умягчение на ионообменной смоле

Выбор смол для умягчения воды должен соответствовать законодательству конкретной страны

Катионные смолы обменивают свои ионы Na^+ на ионы Ca^{2+} и Mg^{2+} обрабатываемой воды. Анионный состав воды не меняется. Таким образом, полученная вода имеет нулевую общую жесткость, она коррозионна, и пить ее неприятно, необходимо поддерживать остаточную жесткость порядка 8–15 °F, умягчая только часть потока воды, который затем смешивается с оставшимся потоком. Этот тип умягчения интересен тем, что он не дает твердых отходов и может осуществляться под давлением.

Карбоксильные смолы позволяют фиксировать ионы кальция, связанные с бикарбонатами, получаемая вода является кислой, поскольку бикарбонаты превращаются в CO_2 , следовательно, надо дополнять обработку удалением CO_2 отдувкой, затем окончательной нейтрализацией гидроксидом натрия.

3.2.3. Электродекарбонатация

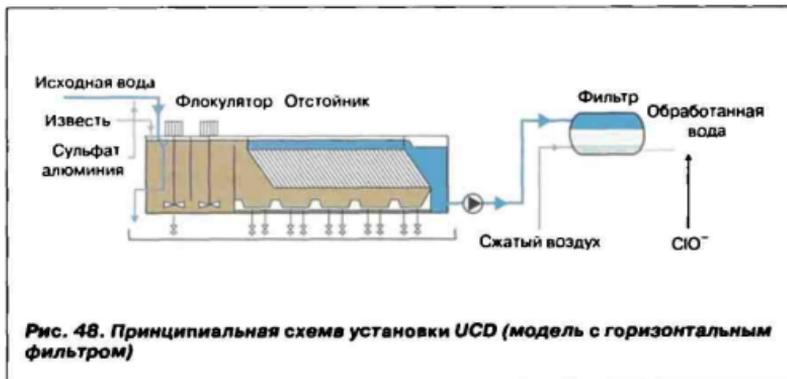
Если нужно добиться только небольшого снижения содержания кальция, можно также осуществлять осаждение, генерируя ионы OH^- на поверхности электрода во время электролиза воды. В таком случае речь идет об **электродекарбонатации**, которую обычно выполняют непосредственно в трубопроводе.

4. Компактные стандартные установки

В области создания компактных установок, активно развивающейся с тех пор, как некоторые страны приняли постоянно действующие программы обеспечения мелких населенных пунктов качественной питьевой водой, компания «Дегремон» всегда использовала результаты технического прогресса. Так, например, можно упомянуть традиционные установки осветления, описанные в предыдущих изданиях справочника компании, типа **GSF**, **Bidondo**, **Cristal M**. Такие установки могут еще применяться от случая к случаю, однако в настоящее время компания «Дегремон» предлагает установки четырех новых типов.

4.1. Установка UCD

На рис 48 показана компактная установка компании «Дегремон» **UCD** (от фр *Unité Compacte Degremon*). Она выполняет осветление и фильтрацию, что обычно необходимо для производства питьевой воды из поверхностных или подземных вод, не содержащих избыточного количества солей и свободных от химических загрязнений (< 500 мг/л ВВ, при уменьшенной производительности функционирование возможно при содержании ВВ до 2 г/л).



Существует 14 моделей производительностью 5–720 м³/ч (1,4–200 л/с), смонтированных на рамах. Три из них показаны на фото 26 и 27. Эти установки могут быть автоматическими или полуавтоматическими, в их состав входят:

- электрический шкаф управления,
- узел приготовления и введения реагентов (сульфат алюминия, карбонат натрия или известь, гипохлорит кальция или натрия),
- статический коагулятор и флокулятор с механическим перемешиванием,
- открытый пластинчатый отстойник, работающий на скорости порядка 0,7 м/ч,
- камера накопления отстоянной воды, которая затем забирается откачкой,
- вертикальные или горизонтальные фильтры для напорной фильтрации (скорость 8–12 м/ч) в зависимости от модели, промываемые воздухом и водой (взаимная промывка, резервуар с промывной водой не нужен);
- устройство для обеззараживания хлором



Фото 26. Две модели установок UCD: 720 (на первом плане) + 540 (на втором плане). Вода из водохранилища Низип (Гвзинтеп, Турция). Производительность 29 000 м³/сут



**Фото 27. Установка UCD-50 (Тизи Узу, Алжир).
Производительность 1200 м³/сут**

Фильтрация под давлением, расположенная после гравитационного отстаивания, за которым можно легко наблюдать, дает преимущества в эксплуатации: более продолжительные фильтроциклы, обработанная вода может поступать прямо в резервуар или сеть (остаточное давление составляет стандартные 2 бара и может быть увеличено при необходимости).

Такие компактные станции производительностью до 80 м³/ч могут размещаться в контейнерах. Каждая несущая рама подбирается по размерам контейнера. Их размещение на площадке (гидравлическое и электрическое подключение) осуществляется очень быстро, для него требуется только простая опорная плита (если возможно, под навесом, как показано на фото 28) и желоб, соединенный со сточной канавой для удаления осадка отстойников и промывных вод фильтров.

4.2. Установка Pulsapak

Особенно хорошо пользующаяся спросом в Северной Америке компактная установка **Pulsapak** включает металлический отстойник **Pulsatube** (см. гл. 10, п. 3.3) в комбинации с двумя гравитационными двухслойными фильтрами (антрацит + песок). Существуют варианты установок шести стандартных размеров производительностью в пределах 35–135 м³/ч. Если исходная вода загрязнена умеренно, то можно дополнительно вводить ПАУ, чтобы использовать преимущества взвешенного слоя осадка.

4.3. Установка UEP

Установка UEP для удаления пестицидов размещается после некоторых перечисленных выше установок или непосредственно на прозрачной подземной воде, состоит из одного или двух закрытых металлических фильтров с ГАУ, работающих со скоростью примерно 6 об/ч на объем загрузки под давлением максимум 8 бар. Фильтры промываются только водой (25 м/ч) или, по желанию заказчика, воздухом, за-

тем водой. Существует три стандартных размера установки, которые соответствуют производительности 10–20–50 м³/ч

4.4. Установка **Ultrasource**

Этот тип компактной установки был разработан компанией «Аквакурс» (дочерняя по отношению к компании «Дегремон») с применением мембран ультрафильтрации **Aquasource**, что позволяет осуществлять одновременное осветление и обеззараживание без каких-либо реагентов. Установка размещается в алюминиевом контейнере стандартного размера, 1,8 × 11,5 × 1,25 м (см. фото 28). Установка спроектирована по принципу комода с выдвижными ящиками: в зависимости от числа ящиков (2 или 4) и количества модулей **Ultrazur 100** в каждом из них (по 3 или 4) производятся четыре базовые модели, а также пятая, 24-модульная, с более длинным контейнером (табл. 13)

Таблица 13

Число модулей	6	8	12	16	24
Средняя производительность при 20 °С, м ³ /ч	4	5,5	8	11	16

Таким образом, можно легко переходить от одной модели к другой, добавляя модули, что позволяет, при необходимости, распределять инвестиции во времени.

Установка функционирует в фронтальном режиме с обратной промывкой каждые 30–90 мин. Эта последняя операция основана на принципе **взаимной промывки** одного модуля обработанной водой от других продолжающих работать модулей, поэтому нет необходимости хранить запас воды для промывки.

Помимо автономности преимуществ установки являются легкость транспортировки и размещения, электропитание как у бытового прибора от обычной сети 220 В (50 или 60 Гц), потребляемая мощность 2,5 кВт.

Установка укомплектована датчиками и картой микропроцессора, позволяющими непрерывно отслеживать параметры функционирования (расход, давление, проницаемость мембран) на месте размещения или «удаленно» посредством дистанционного контроля и управлять питающим насосом.

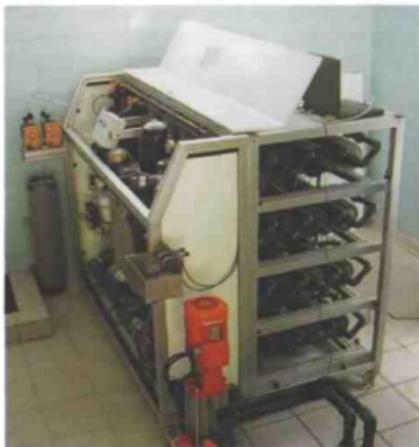


Фото 28. 16-модульная установка **Ultrasource** (Сан-Дизье, Франция)

5. Реконструкция существующих станций

Удовлетворение растущих потребностей в воде лучшего качества часто осуществляется путем реконструкции и модернизации существующих сооружений, по крайней мере когда ресурсы ограничены и/или когда строительство новых станций не предусматривается в ближайшей перспективе

Очевидно, что первые действия по реконструкции станции состоят в замене старого, пришедшего в негодность оборудования и ремонте сооружений, с тем чтобы вернуть станции как минимум начальную производительность. Во время этих операций случается так, что замена типа оборудования и материалов позволяет улучшить или облегчить эксплуатацию (например, замена или установка оборудования дозирования реагентов, задвижек регулирования фильтров или отвода осадка из отстойников, расходомеров и др.).

Кроме этих простых действий по приведению станции в рабочее состояние должны быть предприняты меры для достижения более амбициозных целей: увеличение производства обработанной воды и/или повышение ее качества в более совершенном техническом исполнении, соблюдение новых норм качества питьевой воды, снижение расходов и др.

Приведем несколько примеров реконструкций, включающих модернизацию станций.

5.1. Увеличение мощности и/или улучшение качества обработки

Для оптимизации гидравлических условий, если необходимо, предусматривают различные меры

■ Изменение химической обработки

Изменение типа коагулянта, добавление окислителя и/или флокулянта и др.
Внедрение реминерализации (CO_2 + известь) для защиты сети распределения (например, станция «Papiasabo» в Куру, Французская Гвиана, или станция «Rivière blanche» на Мартинике)

■ Улучшение коагуляции-флокуляции

Предполагает, например, размещение или модернизацию резервуаров коагуляции и/или флокуляции (станция в Кали, Колумбия, станция «Ngith» в Дакаре, Сенегал)

■ Улучшение отстаивания

Переоборудование старых статических отстойников (дефлекторы желоба, коллекторы сбора осадка) при необходимости с помощью математического моделирования динамики движения жидкостей и газов (например, станция «Telibong» в Кота-Кинабалу, Малайзия). Преобразование старых отстойников в пластинчатые (например, станция «Piton du Milieu» на о. Маврикий, станция «Rivière blanche» на Мартинике).

Преобразование статического отстойника в отстойник **Pulsator** (например, станция в Александрии, Египет) или отстойника **Circulator** в отстойник **Pulsator** (например, станция в Монтбризоне, Франция)

Преобразование отстойника **Pulsator** в отстойник **Pulsatube** или отстойника **Superpulsator** в **Ultrapulsator** (см гл 10, п 3 З) существует множество таких примеров во Франции, Канаде, США и других странах

■ Изменения, касающиеся флотации

В зависимости от конкретного случая возможно.

- улучшение гидравлики флотации сжатым воздухом;
- преобразование статического отстаивания во флотацию;
- защита существующей флотации предварительным отстаиванием (например, станция в Нэиз-Млатузе, Южная Африка);
- преобразование флотации в статическое отстаивание, простое или тонкослойное (например, станция в Шеньянге, Китай, где мутность может превосходить 3000 NTU)

■ Фильтрация

Возможны следующие разнообразные мероприятия

- замена фильтрующей загрузки (например, станция в Графхеме, Великобритания);
- изменение способа промывки с установкой несущего пола с дренажными колпачками (классического или типа **Azurfloor**) для одновременной промывки воздухом и водой (например, станции «San Martin» в Буэнос Айресе и «Suquia» в Кордобе, Аргентина, «Ngith» в Дакаре, Сенегал, «Piton du Milieu» на о. Маврикий, «Rivière blanche» на Мартинике);
- модернизация регулирующего оборудования (например, станции «Mont Valérien» и станция в Безансоне, Франция; «Umbeluz» в Мапуту, Мозамбик);
- в случае медленной фильтрации установка предварительной обработки осветлением и/или последующей доочистки озоном + ГАУ (например, станции системы водоснабжения Парижа в Иври и Жуанвиле).

5.2. Выход на новые нормы качества воды

Ниже описаны меры, необходимые для приведения в соответствие нормам некоторых параметров питьевой воды

■ Тригалогенметаны

Для снижения опасности появления тригалогенметанов отказываются от предварительного хлорирования, заменяя его предозонированием (например, станция «Mont Valérien» в Парижском регионе, станции в Лиможе, Метце и в Орли, «Ragасабо» в Куру, Гвиана; станции в Графхеме и Ханнингфильде, Великобритания), и обеспечивают тщательное удаление предшественников появления тригалогенметанов (см ниже) перед окончательным хлорированием

■ Пестициды и другие проблемы, связанные с ОБ (включая привкусы и запахи)

- Оптимизация коагуляции.
- Введение ПАУ перед отстойником со слоем взвешенного осадка (**Pulsator**), который служит хорошим контактным резервуаром. Например, на станции в Обержанвиле, возле Парижа, для защиты существующих установок нитрификации и фильтров доочистки (фото 29) при обработке подземной воды были установлены отстойники с вводом ПАУ

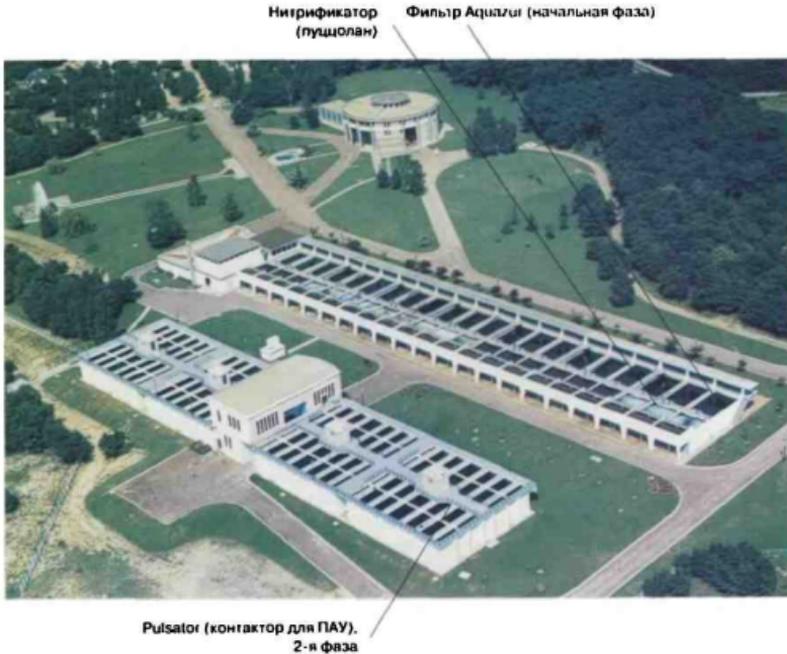


Фото 29. Реконструкция. Производительность 150 000 м³/сут (Обержанвиль, Франция)

- Применение процесса **Cristal** (ПАУ + ультрафильтрация — см п. 1.7.2) после технологической линии осветления (например, станция в Винье, Франция)
- Преобразование песчаных фильтров в фильтры с ГАУ (например, станции в Вири-Шатильон и Морсанге (1 очередь) около Парижа, завод питьевой воды «Mouille» в Донкерке, Франция, станция в Брно, Чехия)
- Сооружение фильтров с ГАУ на второй ступени фильтрации, это решение предпочтительнее предыдущего, если имеется свободное место (множество примеров во Франции, Англии, Италии и других странах)

■ Нитраты

Введение дополнительной стадии денитрификации ионным обменом в конце технологической линии после осветления (например, станция «Kerpilis» в Ленсевене или «Rest» в Плуенане) или стадии биологической денитрификации в начале или в середине технологической линии в зависимости от конкретного случая (например, станция «Viller» в Ниорте, Франция)

■ Аммоний

Введение реактора нитрификации (например, станция в Лувенсьенне возле Парижа; станция «Okhla» в Дели, Индия)

■ Свинец (профилактика)

Внедрение декарбонатации известью богатых бикарбонатами кальция вод с очень низким значением pH_s , уравнивающее содержание CO_2 в которых мешает образованию защитного отложения гидрокарбоната свинца на поверхности трубопроводов (см п. 3.2).

5.3. Выводы

Можно привести множество других мотивов реконструкции/модернизации, например автоматизация процесса обработки вод и контроль за ним, охрана окружающей среды, снижение эксплуатационных затрат и др.

В целом реконструкция/модернизация, нередко комплексная, нацелена на увеличение производительности, обеспечение безопасности функционирования станции и др. и предполагает изначально хорошее знание

- площадки,
- состояния сооружений и оборудования,
- требований к качеству получаемой воды

Следовательно, необходим **тщательный анализ работы** станции, сопровождаемый, если необходимо, соответствующими исследованиями и даже пилотными испытаниями, позволяющими проверить влияние новых вводимых процессов (оборудования) и пр. на последующие стадии обработки воды. При этом подача воды на распределение не может прерываться — недопустимо останавливать производство на срок, превосходящий время хранения запасов воды в водонапорных башнях сети потребления, поэтому нужно планировать стадийность работ. Таким образом, в выборе нового оборудования и концепции работ руководителям необходимо проявлять творческий подход и свои технические знания.

Среди многочисленных примеров можно привести полностью реконструированную станцию «Rivière Blanche» на Мартинике. На ней:

- достигнуто увеличение производительности с 1200 до 1500 м³/ч без строительства новых сооружений;
- проведена модернизация блока процеживания (решетки Джонсона),
- горизонтальные отстойники с плоским дном преобразованы в пластинчатые отстойники, защищенные на поверхности съемными тентами, с внедрением автоматизированных роботов для удаления осадка;
- выполнена модернизация фильтров (установка несущего пола Azurfloor с дренажными колпачками; замена песка, системы промывки воздух + вода, регулирования и др.), значительное увеличение скорости фильтрации, обеспеченное этими мероприятиями, освобождает для другого использования площади, занятые частью старых фильтров,
- предусмотрена реминерализация воды газом CO_2 и известковой водой (приготовленной в сатураторе),
- полностью автоматизировано приготовление и дозирование реагентов, а функционирование станции контролируется компьютером,
- внедрено резервное электропитание от генераторной установки;
- во время проведения работ постоянно поддерживалась стабильная подача воды в сеть распределения.

На иллюстрациях можно видеть: состояние статических отстойников перед реконструкцией (фото 30) и после реконструкции (фото 31), общий вид реконструированной станции (фото 32)

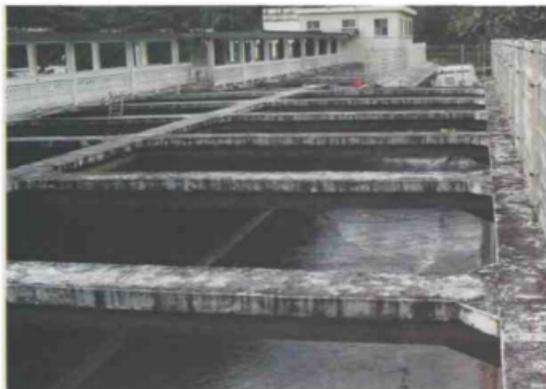


Фото 30. Станция «Rivière Blanche» (Мартиника) перед реконструкцией. Производительность 28 800 м³/сут



Фото 31. Станция «Rivière Blanche» (Мартиника) после преобразования горизонтальных отстойников с плоским дном

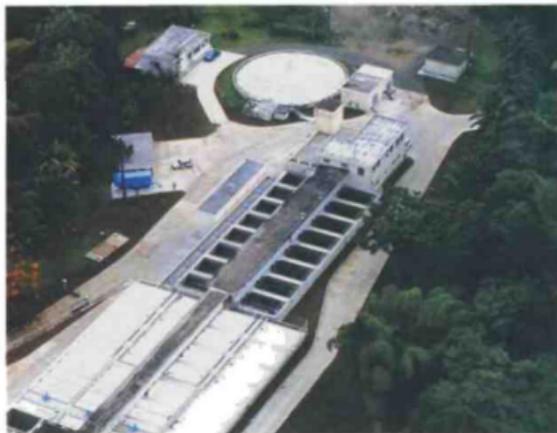


Фото 32. Станция «Rivière Blanche» (Мартиника) после реконструкции. Производительность 36 000 м³/сут



Глава **23**

-
1. КОНЦЕПЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЛИНИИ:
ОГРАНИЧЕНИЯ 1531
 2. ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЙ И ЛИНИЙ
ОБРАБОТКИ ВОДЫ 1540
 3. ПРИМЕРЫ ТИПИЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ЛИНИЙ ОБРАБОТКИ ГСВ 1550

Обработка городских сточных вод

В этой главе описываются технологические линии по обработке городских сточных вод (ГСВ), позволяющие достичь необходимого качества перед их сбросом (с учетом местных норм и различных местных ограничений) и даже повторным использованием, включая наиболее продвинутые возможности (непрямое использование в питьевом водоснабжении или производство ультрачистой воды)

В предлагаемых линиях обработки ГСВ используются физико-химические и биологические процессы, основы которых описаны в гл. 3 и 4, а также технологии и технические средства компании «Дегремон» — установки для предварительной обработки, отстойники, фильтры биологические системы мембраны (см. гл. 9 и 15)

1. Концепция технологической линии: ограничения

Разнообразие процессов и технологий обработки ГСВ и их комбинации (см. гл. 4 и 11), особенно принимая во внимание необходимость обработки образующихся осадков (см. гл. 18, п. 1, рис. 1), очень велико. Однако для разработчика проекта

станции обработки ГСВ их выбор сокращается по мере учета многочисленных «местных» ограничений наряду с основной целью — достижением минимальной общей стоимости (амортизация инвестиций и эксплуатационные затраты)

Наиболее важные и распространенные ограничения связаны со следующими факторами

- природа и изменчивость обрабатываемых ГСВ;
- соблюдение показателей качества обработанной воды и надежности;
- конечное назначение осадков, образующихся на очистных сооружениях,
- воздействие на окружающую среду,
- возможность реализации конструктивных решений,
- ориентация на длительное устойчивое развитие,
- возможная реконструкция всей или части существующих сооружений, что поднимает проблему стабильности проведения работ.

И этим список не исчерпывается

Сначала мы проанализируем влияние перечисленных ограничений, в п. 2 рассмотрим технологии, которые лучше всего удовлетворяют поставленным целям, а в п. 3 приведем 12 типовых примеров очистных сооружений, спроектированных и построенных в последние годы.

1.1. Природа и изменчивость обрабатываемых ГСВ

Как упоминалось в гл. 2, пп. 4 и 5, затем в гл. 4, п. 1, ГСВ классифицируются по их происхождению (в сухое или дождливое время года), по влиянию на них промышленных сточных вод (ПСВ), иногда попадающих в сеть, и в особенности:

- по величине дневного и часового расходов с учетом изменений, вызванных активностью жителей или промышленности, метеорологическими условиями, другими периодическими событиями (выходные, отпуска и т. п.) и любыми другими факторами, данные о частоте и значительности которых необходимы для оптимизации технологической линии,
- по уровню загрязненности вод взвешенными веществами (ВВ), органическими веществами (ОВ, БПК и ХПК), азотом по Кьельдалю (НК), общим фосфором (РТ) и другими соединениями (в том числе патогенными агентами). Однако, как было отмечено в гл. 4, п. 1.8, этих общих параметров недостаточно, и весьма желательна более точная типология подлежащей обработке воды,
- по наличию дополнительного поступления извне (нечистот из выгребных ям, отходов от чистки сетей канализации или сбросов жиров),
- по способу транспортировки к месту обработки, который определенным образом влияет на природу ГСВ (степень септичности, содержание сульфидов и т. д.), поэтому данные о типе сети (общесплавная, раздельная или комбинированная), ее протяженности и гидравлическом профиле также очень полезны, чтобы предвидеть влияние этих показателей на очистные сооружения

1.2. Обеспечение качества и надежности

Требуемое качество очистки ГСВ регламентируется местным или национальным законодательством и часто зависит от места сброса. В Европе Директива от 21 мая 1991 г. (см. гл. 2, п. 4.7) определяет три типа зон сбросов, соответствующих трем различным уровням обработки ГСВ

- обычные зоны,
- чувствительные зоны,
- менее чувствительные зоны

Примечание Применение во французском праве этой директивы вызвало появление Постановления от 22 декабря 1994 г., фиксирующего уровни сброса для объектных зон (снижение содержания ВВ и ОВ, ХПК и БПК) и чувствительных зон (снижение загрязнений, связанных с азотом и фосфором)

Эти регламентирующие документы требуют соблюдения показателей качества очищенных ГСВ, в том числе путем установления **минимальных пределов надежности** очистных сооружений во время их эксплуатации более чем $x\%$ полученных результатов должны соответствовать норме, при этом величина x и частота отбора проб определяются с учетом размеров очистных сооружений (см ссылку к Постановлению NOR. ENVE9430438A или ее резюме в гл 2, п 4 7)

Для соблюдения нормативных требований проекты предлагаемых очистных сооружений должны включать

- **расчет параметров с учетом требований безопасности**, адаптированный к изменению нагрузок,
- **множественные линии обработки** для облегчения проведения тяжелых операций технического обслуживания, необходимых при эксплуатации очистных сооружений;
- **резервное оборудование** для поддержания непрерывности используемых технологических процессов,
- **средства автоматизации и резервные устройства**, способные при необходимости объединить отдельные источники питания, даже вспомогательные, в группы (см гл 21, п 2) в целях обеспечения надежности работы очистных сооружений,
- **системы содействия эксплуатации станции** (см гл 21, п 3)

Еще более строгие требования выдвигают для **прибрежных морских зон**, где разводятся устриц и мидий, или **зон купания**, в которых необходимо обеззараживание сбросов в целях уничтожения вредных микроорганизмов. В этих случаях сооружения должны быть укомплектованы дополнительными установками доочистки, снижающими содержание ВВ и облегчающими процесс обеззараживания. УФИ (ультрафиолетовое излучение), хлорирование и озонирование (см п 2 3)

В случае повторного использования очищенной воды для нужд промышленности, полива почв и зеленых насаждений или питьевого водоснабжения (см гл 2, п 4 8), направленного на уменьшение забора воды из природной среды, также применяют дополнительные технологические линии, укомплектованные кроме всего прочего надежными установками обеззараживания

1.3. Конечное назначение осадка: глобальная оптимизация

Очистные сооружения, каковы бы ни были их размеры, технологические линии и нормы качества очищенной воды, производят осадки. Их количество связано с видом самого технологического процесса (первичная обработка, физико-химическая обработка, биологическая обработка)

Значительно снизить количество образующихся осадков можно, только используя специальные установки и влияя непосредственно на технологический процесс обработки ГСВ: так, уменьшение производства биологических осадков ферментативным путем по способу **Biolysis E** или химическим путем по способу **Biolysis O** (см. гл. 11, п. 4) происходит только после введения ферментов или эффективной обработки озном, в этом случае, если стремятся к максимальному сокращению количества образующихся осадков, первичное отстаивание не рекомендуется.

Технологические линии обработки осадков подробно описаны в гл. 18 и 19. Однако разработчик должен решить задачу общей глобальной оптимизации очистных сооружений, т. е. отдать предпочтение конкретной технологии обработки ГСВ с обязательным учетом типов образующихся осадков и их соответствия возможным вариантам конечного назначения (см. гл. 18, п. 1, рис. 1).

Поскольку какой-либо перечень комбинаций технологических линий обработки ГСВ и осадков будет в любом случае неполным, мы выделим лишь основные тенденции на основе классификации осадков (см. гл. 2, п. 6.1, табл. 69), которые показывают, что:

- **осадки очистных сооружений главным образом являются органическими гидрофильными** и, следовательно, удаление входящей в их состав воды никогда не будет простым.
- **несмотря на значительное содержание ОВ в первичных осадках, присутствие последних положительно влияет на способность к обезвоживанию всей массы осадков** и на теплоту сгорания, облегчая реализацию технологических линий, которые включают разложение ОВ, например сжигание.

Таким образом, только определив конечное назначение осадка, можно выбрать наилучшее сочетание производимых осадков и, следовательно, наиболее подходящую технологическую линию обработки ГСВ. При определении оптимального варианта часто необходимо прибегать к последовательным шагам в проведении расчетов.

Приведем простой пример. предположим, что для технологической линии обработки ГСВ в чувствительной зоне сброса предварительно предусмотрен простой вариант удаления азота — в одну стадию с низкой нагрузкой. При такой обработке образуется очень гидрофильный осадок, дающий при обезвоживании низкое содержание сухих веществ (СВ, примерно 18–22%), хотя включение в эту линию первичного отстаивания позволило бы достичь более высоких значений.

Разработчик, таким образом, рассчитывал упростить технологическую линию и снизить стоимость очистных сооружений, но тогда ему следовало бы дополнить линию обработки осадков для достижения заданного содержания СВ (например, 30% путем введения извести) в целях последующего захоронения осадков или последующего их использования в сельском хозяйстве, а в худшем случае предусмотреть затраты на закупку дополнительного топлива для обработки осадков другими способами (сушка, сжигание, пиролиз).

Таким образом, общий баланс покажет разработчику, что вариант извлечения из ГСВ азота технологией с «очень низкой нагрузкой» не является оптимальным, и поэтому необходимо рассмотреть и другие технологии обработки.

Приведенный пример объясняет то, что для больших современных очистных сооружений (таких как станции «Achères» и «Valenton» для компании «SIAAP» в департаменте Верхняя Сена в регионе Парижа, Франция) первичное отстаивание является обязательным, даже если образующиеся в результате смешанные осадки требуют дополнительной стабилизационной обработки анаэробным сбраживанием в целях обеспечения их последующего вывоза без риска вредного воздействия и ферментации. С другой стороны, первичные осадки обладают повышенной теплотой сгорания, благоприятной для термических процессов (см. п. 3, рис. 4 и фото 1 и 2).

Как правило, в Европе, где

- утилизация осадков от сооружений очистки ГСВ в сельском хозяйстве вызывает все большие сомнения,
- захоронение способных к брожению осадков будет запрещено в долгосрочной перспективе,



**Фото 1. Станция «La Farfana» в Сантьяго (Чили).
Производительность 760 000 м³/сут.
На первом плане: 8 метантенков объемом 16 000 м³**

основным рассматриваемым решением являются энергетическое или тщательно контролируемое сельскохозяйственное использование (устойчивые обеззараженные продукты гарантированного состава и т. д.)

Наблюдаемая сегодня тенденция состоит в том, что

— для малых станций наиболее разумным решением является местное сельскохозяйственное использование, часто со стабилизационной обработкой известью (кроме отправки осадков на площадки сбора обезвоженных осадков).



Фото 2. Станция очистки сточных вод в г. Тур (бассейн Эндр-и-Луара, Франция): вид с воздуха. Производительность 47 000 м³/сут

— для больших и средних очистных сооружений возможны либо прямая энергетическая утилизация, либо **набор решений**, позволяющих эксплуатирующей компании выбрать наиболее благоприятный вариант. При этом **сушка является практически неизбежной стадией** обработки осадков, поскольку она

- дает возможность минимизировать стоимость транспортировки осадка для любого конечного назначения;
- обеспечивает полностью контролируемое сельскохозяйственное использование осадков, вплоть до их введения в качестве добавки в химические удобрения в целях формирования гарантированного азотно-фосфорно-калиевого (NPK) состава;
- позволяет производить энергетическую утилизацию осадков (сжигание, газификация, совместное сжигание с бытовыми отходами, сжигание при производстве цемента, на теплоцентрали и т. п.).

Прототипом комплексных очистных сооружений ГСВ является станция «Valenton» (для компании «SIAAP»), где возможны все варианты обработки осадков (см. п. 3, рис. 4). В п. 3 приведены примеры действующих в Европе очистных сооружений, на большинстве из которых используется сушка осадков, несмотря на энергетические затраты по снабжению биогазом или даже на применение более сложных технологий когенерации энергии (см. гл. 19, п. 3).

Любые возвраты в начало технологической линии обработки как осадка, так и воды оказывают существенное влияние на качество обработки потока ГСВ, и это влияние как по нагрузке (ВВ, БПК, ХПК, азот и фосфор), так и по расходу должно учитываться при расчете очистных сооружений. Это прежде всего касается.

- установок биофильтрации, формирующих промывные воды, которые
 - или повторно вводятся в начало стадии предварительной обработки,
 - или обрабатываются отдельно в технологической линии отстаивания.

Понятно, что в этих двух случаях влияние на технологическую линию обработки ГСВ не будет одинаковым, поскольку промежуточное отстаивание позволяет избежать резких изменений нагрузки (главным образом, возвратов ВВ) и даже расхода (при отстаивании необходимо добиваться более равномерного распределения возвращаемых потоков).

— сбраживания осадков (возвраты ВВ, NH_4^+ и P). В случае когда технологическая линия очистных сооружений включает стадию биологической дефосфатации, анаэробное сбраживание осадков, как полагают многие авторы, должно быть исключено, поскольку оно вызывает риск существенного увеличения содержания фосфора. На самом же деле значительная часть фосфора снова фиксируется в осадке, что позволяет применять при анаэробном сбраживании осадков и биологическое извлечение фосфора из ГСВ (см. гл. 4, п. 2.1.4).

На больших очистных сооружениях, таких как станция «Valenton» или станция в городе Тур (Франция), отдельная обработка возвратов от метантенков может улучшить технологическую линию обработки ГСВ в части удаления азота (способы *Cyclor* или *Meteor*), и фосфора (физико-химическое осаждение из концентрированного потока).

1.4. Воздействие на окружающую среду (эстетика, запахи, шумы): компактность

На выбор технологии очистки ГСВ оказывают большое влияние экологические ограничения.

- очистные сооружения, построенные в городской или жилой зоне, должны занимать минимум места, чтобы как можно лучше интегрироваться в местность

(с точки зрения эстетики и архитектуры), и иметь полное укрытие в целях достижения «нулевой вредности» (шумы, запахи).

— в определенных целях могут проектироваться сооружения самых разных размеров, однако компактные установки лучше всего удовлетворяют амбициозным экологическим задачам.

Современные технологии позволяют **уменьшить размеры** очистных сооружений и таким образом облегчить их интеграцию в окружающую среду.

— **первичное тонкослойное отстаивание**, примененное к обработке ГСВ, развивается в направлении уменьшения размеров традиционных первичных отстойников (например, использование отстойников **Sedipac 3D** позволяет снизить производственную площадь в 3–4 раза, **Densadeg 2D** или **4D** — в 5–7 раз).

— **установки биофильтрации** (фильтр **Biofor**) успешно могут заменить аэротенки с активным илом (АИ) и осветлители и, в зависимости от конкретных обстоятельств, уменьшить размеры производственной площадки очистных сооружений в 4–7 раз.

— **мембранная фильтрация** может заменить конечное осветление для отделения осадка от обработанной сточной воды (установка **Ultrafor**), например, размещение установок **Ultrafor** на сооружениях очистки ГСВ в городе Грасс Румигьер (фото 3) позволило уменьшить занимаемую ими площадь почти в 3 раза



Фото 3. Макет очистных сооружений в Грассе, Франция (23 000 ЭЖ), имеющих в своем составе систему Ultrafor

Компактные сооружения гораздо проще укрывать в целях решения проблем шумов и запахов. Приведем в качестве примера станции очистки ГСВ -Marbella- (Франция) с установками **Densadeg + Biofor** (см. рис 17, п. 3), в Торбейе (Франция) с установками **Densadeg + Biofor** или городские очистные сооружения в Ницце, которые спроектированы еще в 1986 г по такой же технологической схеме (первичное тонкослойное отстаивание и биологическая обработка в крытых реакторах с высокой нагрузкой) и размещены вдоль прибрежного Английского бульвара и вблизи аэропорта (фото 4).

Кроме того, такие станции готовы к внутренней перегруппировке сооружений, к размещению установок в едином здании или в местах, защищенных другим образом (под стадионам, паркингом, парком и т. п.), что позволяет также централизовать сбор образующихся газов в целях их дезодорирующей обработки (см гл 16, п 2)



Фото 4. Укрытые сооружения очистки ГСВ в Ницце (Приморские Альпы, Франция). Производительность 220 000 м³/сут

Вконец, компактность очистных сооружений значительно упрощает принятие архитектурных решений.

Поскольку заказчик часто требует, чтобы очистные сооружения, крытые или нет, не вызвали протеста жителей, необходимы как разъяснительные, так и образовательные меры, которые начинаются с соответствующего архитектурного решения с учетом конкретной местности

Хорошим примером является станция очистки ГСВ «Seine Centre» в городе Коломб (регион Парижа, Франция, для компании «SIAAP») Ее здание обращает на себя внимание значительностью архитектуры и застекленными фасадами, не акцентируя внимание жителей на том, что это очистные сооружения (фото 5)



Фото 5. Фасад станции очистки ГСВ в г. Коломб (Верхняя Сена, Франция). Производительность 240 000 м³/сут

1.5. Конструктивные решения

Естественно, что все принятые (после учета сформулированных выше ограничений) технологические решения должны быть осуществимыми с точки зрения устройства фундаментов и требований гражданского строительства сооружений, а также местных условий, связанных

- с инженерной геологией грунтов,
- с наличием и уровнем водоносного горизонта,
- с существованием риска наводнения,
- с условиями восстановления окружающей среды

В результате общие стоимости различных вариантов очистного сооружения будут сильно различаться и лишь один из них будет оптимальным

Примечание Затраты на общестроительные работы обычно составляют более 60 % от общей стоимости объекта

Наиболее строгим ограничением является требование по гидравлической стабильности работы сооружений, совместимой с необходимыми и запрограммированными операциями опорожнения отдельных его установок

Итак, кроме случаев, когда промежуточное повышение расхода сточных вод позволяет установить «автостабильность» очистных сооружений при разумном увеличении стоимости энергозатрат, компактные установки (тонкослойные отстойники, мембранные биореакторы) имеют преимущество в сравнении с сооружениями со значительной поверхностью воды (бассейны аэрации и осветления). Последние вынуждают принимать особые геотехнологические меры, такие как понижение уровня водного горизонта, гидроизоляция установки с откачиванием грунтовых вод и даже укрепление донных плит и балластировка

1.6. Ориентация на длительное устойчивое развитие

Во время проектирования очистных сооружений учет необходимости длительно-го устойчивого развития ведет к тому, что кроме общей стоимости следует принимать во внимание, является ли станция

- более или менее энергозатратной и производящей газ, создающий парниковый эффект,
- производящей минимум отходов (имеется в виду сокращение затрат на их транспортировку и захоронение),
- использующей минимум реагентов (имеется в виду, что их производство способствует эмиссии парниковых газов и постоянному образованию отходов),
- производящей утилизируемые побочные продукты (осадок для использования в сельском хозяйстве, шлаки для производства новых материалов и т.п.)

С учетом совокупности всех ограничений (см. пп. 1.1–1.6), как правило, невозможно выбрать одну оптимальную технологическую линию, и в этом случае, как уже говорилось, главную роль снова играет общая стоимость

1.7. Частный случай реконструкции очистных сооружений

Изменение норм на сбросы загрязнений и увеличение числа жителей приводят к необходимости модернизации большого числа коммунальных очистных сооружений

Работы по расширению и приведению в соответствие нормам станций очистки ГСВ вносят значительный вклад в появление новых технологий. Действительно, если на некоторых станциях можно использовать имеющиеся установки (например, насосные станции, способные допустить увеличение расхода; отстойники или азротенки, трансформируемые в ливневые бассейны или накопители осадков), то большая часть существующих очистных сооружений требует **переосмысления промышленной площадки в целом** по следующим причинам

- новые мощности, требуемые только для улучшения качества очистки ГСВ, значительно превосходят существующие,
 - состояние имеющихся сооружений (здания и оборудование) часто не может обеспечить требуемую надежность и долговечность. Стоимость модернизации и приведения их в соответствие новым нормам часто превосходит стоимость строительства новых установок, адаптированных к новым задачам,
 - нормы, касающиеся безопасности, сильно изменились, и приведение старых сооружений в соответствие с ними требует проведения больших дополнительных работ,
 - проблематика местоположения новой станции очистки неизбежно будет иной, чем у существующей в момент ее проектирования, поскольку вокруг часто образуется городская среда. Даже если существует и сохранено место для расширения очистных сооружений, экологические ограничения часто таковы, что приходится выбирать другие технологические решения (более компактные и т. д.)
- Именно поэтому большинство проектов реконструкции очистных сооружений сводится к незначительным исправлениям, облегчающим, например, стадийность проведения работ в ожидании общей их перестройки

Однако надо заметить, что модульные по своей структуре линии обработки осадка чаще позволяют продолжать использовать существующие установки или сооружения при условии, что режим их работы остается приемлемым

Наконец, особенности некоторых технологий обуславливают возможность применения существующих сооружений (по конструкции и производительности) в другой функции, чем это было изначально предусмотрено

Приведем в качестве примера биологическую мембранную технологию обработки сточных вод (способ и установка **Ultrasfor** — см. гл. 11, п. 1.6, и гл. 15, п. 4.1.3) или технологию **Météor** с использованием смешанных культур. В обоих случаях можно обеспечить увеличение производительности или осуществить процесс нитрификации на станции, изначально предназначенной только для обработки углеродных соединений, сохраняя при этом основные ее сооружения

2. Выбор технологий и линий обработки воды

2.1. Выбор технологий в зависимости от ограничений

В табл. 1 и 2 предлагаются возможные технологии и способы обработки ГСВ в зависимости от размера населенного пункта и целей очистки, в табл. 1 — при небольших ограничениях, а в табл. 2, напротив, — в основном со значительными ограничениями

Таблица 1
Выбор возможных технологий очистки ГСВ
(населенный пункт с незначительными ограничениями)

Размер населенного пункта	Зона	Возможные технологии (технико-экономический оптимум)
Небольшой (< 10 000 ЭЖ) без особых ограничений, связанных с местностью (месторасположение, близость жилья и т. д.)	Обычная	Активный ил (АИ) с малой или средней нагрузкой АИ с малой нагрузкой в биореакторах последовательного действия (Cyclor) Биологические диски
	Менее чувствительная ¹	Лагуна с естественным или принудительным аэрированием Первичное отстаивание
	Чувствительная	АИ с малой нагрузкой АИ с малой нагрузкой в биореакторах последовательного действия (Cyclor) Одновременное физико-химическое удаление фосфатов
Средний (от 10 000 до 100 000 ЭЖ) без особых ограничений, связанных с местностью (месторасположение, близость жилья и т. д.)	Обычная	Предварительное первичное отстаивание или без него + АИ с малой или средней нагрузкой или + АИ в биореакторах последовательного действия (Cyclor)
	Менее чувствительная ¹	Первичное отстаивание
	Чувствительная	Предварительное первичное отстаивание или без него + АИ с малой нагрузкой (нитрификация-денитрификация) в классическом аэротенке или в биореакторе последовательного действия (Cyclor) + одновременное физико-химическое или биологическое удаление фосфора
Большой (> 100 000 ЭЖ) без особых ограничений, связанных с местоположением	Обычная	Первичное отстаивание (классическое или тонкослойное), например, в отстойниках Sédipac D или Sédipac 3D + АИ со средней или высокой нагрузкой + линия обработки осадков (по выбору)
	Чувствительная	Могут быть предусмотрены любые линии биологической обработки (со свободными, фиксированными или смешанными культурами), с (или без) предварительным отстаиванием или физико-химической обработкой + линия обработки осадков (по выбору)

¹ Понятие не сохранилось во французском законодательстве и соответствует 50%-му снижению содержания ВВ и 20%-му снижению БПК

Таблица 2
Выбор возможных технологий очистки ГСВ
(населенный пункт со значительными ограничениями)

Ограничение	Зона	Возможные технологии ¹ (техико-экономический оптимум)
Значительные ограничения, связанные с местностью (местоположение, близость жилья, непостоянное количество жителей, климатические условия и т. д.)	Обычная	Первичное отстаивание (предпочтительно тонкослойное в установках Sédipac или Densadeg 2D) или без него Предварительная обработка в сочетании с тонкослойным отстаиванием (Sédipac 3D или Densadeg 4D) АИ со средней нагрузкой на компактных установках (биореактор последовательного действия Cyclor и др.) Биофильтрация с извлечением органического углерода (Biofor C)
	Менее чувствительная ²	Первичное тонкослойное отстаивание (Sédipac) или с предварительной обработкой (Sédipac 3D)
	Чувствительная	Первичное отстаивание (предпочтительно тонкослойное в установках Sédipac или Densadeg 2D) или без него Предварительная обработка в сочетании с тонкослойным отстаиванием (Sédipac 3D или Densadeg 4D) АИ с малой нагрузкой (с нитрификацией-денитрификацией) в компактных биореакторах последовательного действия (Cyclor) или мембранных реакторах (Ultrafor) Физико-химическое или биологическое удаление фосфатов + доочистка (Densadeg 2D, Filtrazig и др.) в зависимости от требований к сбросу общего фосфора Биофильтрация для удаления органического углерода с нитрификацией и денитрификацией (Biofor CN, N, DN или pr6-DN — см. табл. 5) Обработка в аноксидной зоне с низкой нагрузкой + биофильтрация (Biofor CN, DN)
Прием дождевых вод дополнительно к бытовым	Независимо от зоны	Ливневый бассейн последовательно или параллельно с основным коллектором Обработка ГСВ на линии, предназначенной для сухой погоды Отдельная обработка избытка дождевых потоков (физико-химическая с отстаиванием в Densadeg 2D 100)
Обеззараживание (см. п. 2.3)	Пляжная зона или зона разведения устриц или мидий или повторное использование	Мембранная обработка (Ultrafor) с или без УФ (см. двойной защитный барьер) Обработка УФ Обработка озоном или перуксусной кислотой Обработка хлором и его производными, если это разрешено Применение лагун
Повторное использование обработанной воды в промышленности, для полива и т. д.	Согласно законодательству	Минимизация содержания взвешенных веществ на предшествующих стадиях линий обработки (фиксированные культуры, мембранный биореактор Ultrafor или третичная мембранная обработка) + УФ или даже хлор (если это разрешено)

¹ Технологии позволяют удобно размещать линии обработки ГСВ или отдельные сооружения для достижения поставленных целей.

² Понятие не сохранилось во французском законодательстве и соответствует 50%-му снижению содержания ВВ и 20%-му снижению БПК.

2.2. Технические параметры различных технологических линий

В табл. 4 и 5 приведены средние расчетные технические параметры различных технологических линий в обычных условиях при обработке достаточно концентрированных ГСВ, которые содержат максимум 30 % нетоксичных ПСВ и состав загрязнений которых характеризуется средними данными, указанными в табл. 3

Таблица 3
Средние показатели состава ГСВ, мг/л

<i>ВВ</i>	300	<i>NT (общий азот)²</i>	60
<i>БПК</i>	260	<i>Общий фосфор</i>	10
<i>ХПК¹</i>	600		

¹ Включая растворенную часть -стойкой- ХПК (неразлагаемой биологическим путем) содержание которой не превышает 30 мг/л

² Включая стойкий неразлагаемый биологическим путем органический растворимый азот содержание которого не превышает 2 мг/л

Для таких ГСВ технические параметры линий обработки определяются

- **эффективностью функционирования**, при этом в документации нужно приводить расчеты, интервал значений, которые учитывают разумную типологию ГСВ, указывать выбранные материалы и особенности эксплуатации,
- **обычно достижимыми целями**, которые лучше, чем эффективность, позволяют сравнить достоинства технологических линий по конкретным показателям (принимая во внимание априори те же условия эксплуатации, используемые реагенты и т. д.)

Таблица 4

Технические параметры технологических линий обработки ГСВ с использованием технологий со свободными или смешанными культурами: эффективность очистных сооружений и концентрации загрязняющих веществ на выходе

№ п/п	Технологическая линия	БВ		БЛК		ХПК		Азот по Кумалько		Азот общий		Фосфор общий	
		Эффектив- ность, %	Концен- трация, мг/л	Эффектив- ность, %	Концен- трация, мг/л								
1	Первичное отстаивание после тонкослойное (Борисов)	50-65	120	25-40	180-225	25-40	400-500	7-12	55			10-20	9
2	Физико-химическая обработка (Дельсбург)	70-95	30-30	50-75	75-150	50-75	175-350	10-20	50			70-90	1-2
3	Первичное отстаивание и АИ с высокой нагрузкой	85	< 40	85-90	< 35	80	< 140	20-25	< 45			30	7
4	АИ со средней нагрузкой	90	30	88-92	30	80-85	120	20-25	< 45			25	8
5	Первичное отстаивание и АИ со средней нагрузкой	90	< 30	90-95	30	80-85	110	25-30	< 40			30	7
6	Продолжная взращивание с АИ и отдельным осветлением или биореактор последовательного действия (Сурьё)	90	30	92-96	< 20	88-90	90	> 90	< 5	> 75	10-15	30 80 > 90 ¹	7 2 < 1
7	Первичное отстаивание и АИ с низкой нагрузкой с нитрификацией и деамбрификацией	90	30	95-98	< 20	90	< 90	90	< 5	> 75	10-15	30 80 > 90 ¹	7 2 < 1
8	Линия 6 или 7 с дополнительной фильтрацией	> 96	< 10	> 96	< 10	> 90	< 65	> 94	< 3,5	> 80	8-12	90 ¹	< 1
9	Линия 6 и 7 с дополнительной физико-химической обработкой (Дельсбург)	> 96	< 10	> 96	< 10	> 92	< 60	> 94	< 3,5	> 80	8-12	90 ¹	< 1
10	Биологическая с АИ с мембранным разделением (Ултрабор)	99	< 1	96-99	< 10	93	50	> 95	< 3	> 80	8-12	30 80 90	7 2 < 1
11	Биологическая в одну стадию на смешанных нитратах (Метроб СМ)	90	30	90-95	30	80-85	110	> 90	< 5	> 75	15	30 90 ¹	7 < 1

¹ Сметри графической (согласно расчету)

² Эффективность измеряется в зависимости от дозы реагентов и типа ГСВ

³ С опорожнением удалением фосфора, 80 % общего фосфора

⁴ Дополнительным удалением фосфора, 90 % общего фосфора

⁵ 90 % общего фосфора при соответствующем остаточном количестве фосфора

Таблица 5

Технические параметры технологических линий обработки ГСВ с использованием технологий с фиксированными культурами: эффективность очистных сооружений и концентрации загрязняющих веществ на выходе

№ п/п	Линия	ВВ		БЛК		ХПК		Азот по Кальцано		Азот общий		Общий фосфор			
		Эффективность, %	Концентрация, мг/л												
12	Первичная отстаивание и промывной биофильтр (пластмассовая загрузка) в одну ступень	85	45	80	80	75	175	15	25	50		20	8		
13	Биоаэро-лиманесная обработка с последующим окислением в одну ступень (Воблер С)	93	20	90	25	87	90	25	45			80-92	0.8-2		
14	Биоаэро-лиманесная обработка с нитрификацией в одну ступень (Воблер СН)	95	15	92-95	15-25	88	80	60-80	12	25		80-92	0.8-2		
15	Биоаэро-лиманесная обработка с нитрификацией в две ступени (Воблер С + Воблер N)	97	10	92-95	5-10	90	70	85-95	3-10			80-95	0.5-1.5		
16	Биоаэро-лиманесная обработка с нитрификацией (Воблер ДРБ-ДН или Воблер двой-ДН)	97	10	96-97	7-12	90	75	91-95	3-5		>75	10-15	0.5-1.5		
17	Биологическая обработка с высокой нагрузкой + биофильтрация с нитрификацией + аэротрансформация + биофильтрация	97	10	96-97	7-12	90	70	91-95	3	5	>75	10	15	30	7
18	Денитрификация с АМ при высокой нагрузке + окислительная зона + биофильтрация (Воблер СН)	93	20	91	25	87	90	90-94	4-6		>70	15	30	7	

¹ С денитрификацией (а соответственно с нитратом)

² В зависимости от степени сорбирования общего фосфора после первичной физико-лиманесной обработки

³ В зависимости от нагрузки по С и N

2.3. Обеззараживание ГСВ

Обеззараживание очищенных ГСВ особо необходимо в случаях

- сброса в зону купания (река, озеро или море),
- сброса в зону разведения устриц и мидий (море),
- наличия норм сброса, как, например, во многих американских штатах,
- большинства вариантов повторного использования (как минимум, когда с утилизированной водой могут контактировать люди: физический контакт, с аэрозолями, при поливе овощей и фруктов и т. п.), начиная с применения в качестве технической воды на самой станции очистки ГСВ

В гл. 3, п. 12, и особенно в гл. 17, пп. 2–7, приведены основные технологии обеззараживания и ожидаемые результаты применения различных химических дезинфектантов: Cl_2 и его производных (ClO , ClO_2 , хлораминов), озона и перуксусной кислоты, так же как и обработки УФ-лучами, которая становится главным инструментом обеззараживания на сегодняшний день по причине своей доступной стоимости и отсутствия образования побочных продуктов

2.3.1. Выбор и расчет параметров обеззараживания

Выбор интенсивности облучения или дозы химических реагентов существенно зависит

- от степени необходимого обеззараживания, выражаемой либо в логарифме удаления микроорганизмов ($2\lg-6\lg$), либо через установленное абсолютное значение остаточного бактериального загрязнения (например, $< 10 E. coli$ на 100 мл),
- от предварительной обработки воды, определяющей остаточное загрязнение
 - по патогенным микроорганизмам;
 - по ВВ, цветности и ОВ, которые могут влиять на эффективность обеззараживания
 - защищая микроорганизмы (ВВ),
 - ослабляя действие УФ-лучей (цветность, ВВ, ОВ, Fe^{3+} , комплексы с Fe и т. п.) в результате снижения прозрачности воды,
 - реагируя с окислителями любое вещество-восстановитель (ОВ, а также S^{2-} , NH_4^+ , Fe^{2+} и т. п.) конкурирует с микроорганизмами за воздействие окислителя, что приводит к повышению дозы обеззараживающего реагента

В табл. 6 приведены типичные концентрации общих и фекальных колиформ перед обеззараживанием в зависимости от предварительной линии обработки

Технологический расчет обеззараживания предполагает прежде всего хорошее знание или по меньшей мере хорошую оценку всех этих параметров. Если эти данные отсутствуют, то можно воспользоваться информацией из табл. 7 — в ней приведены обычные показатели обеззараживания на различных стадиях обработки ГСВ.

Для выбора наиболее подходящего варианта обеззараживания можно следовать алгоритмам, приведенным на двух упрощенных блок-схемах (рис. 1 и 2), в которых указаны основные вопросы, которые следует ставить в отношении ГСВ после первичной или вторичной обработки.

Примечание. Третичное обеззараживание (на рис. 2) предполагает фильтрацию сточной воды после вторичной ее обработки. Все параметры обеззараживания выражены количеством бактерии *E. coli* (EC) или фекальных колиформ (CF) в 100 мл сточных вод. Надо заметить, что для яиц глистов (гельминтов) достаточно эффективна лишь обработка осветлением и фильтрацией

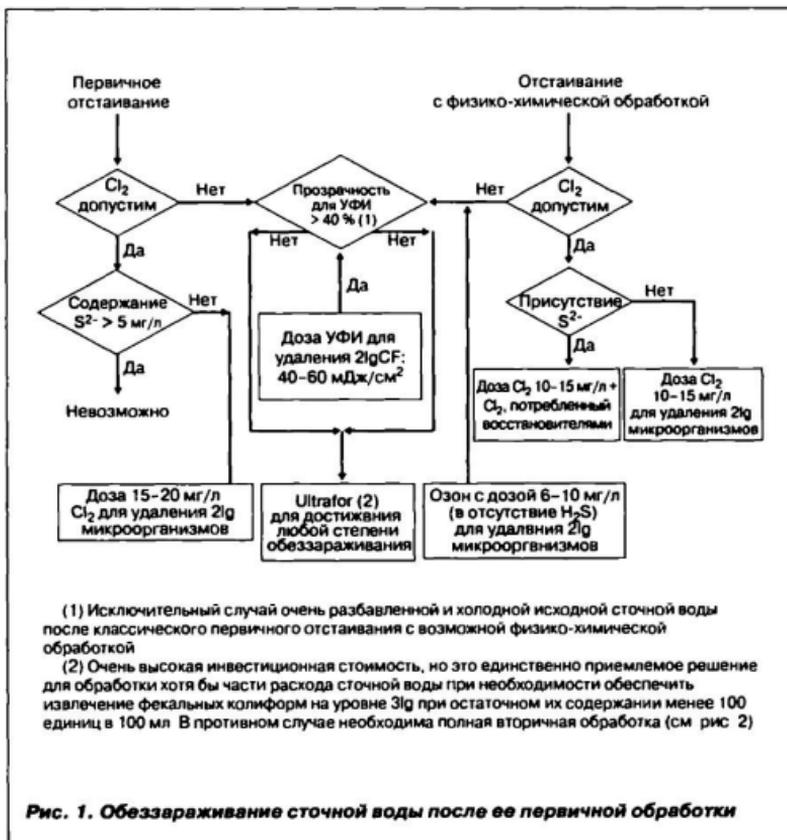
Таблица 6
Типичные концентрации колиформ в ГСВ после различных стадий обработки

Сточная вода	Общие колиформы (количество в 100 мл)	Фекальные колиформы (количество в 100 мл)
Исходная необработанная	$10^8 - 10^9$	$10^7 - 10^8$
После первичного отстаивания	$10^8 - 10^9$	$10^7 - 10^8$
После первичного отстаивания с физико-химической обработкой	$5 \cdot 10^7 - 5 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^6 - 5 \cdot 10^7$
После биологической обработки (активным илом)	$10^6 - 10^7$	$10^5 - 10^7$
После вторичного фильтрования	$5 \cdot 10^5 - 5 \cdot 10^6$	$5 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^6$
После нитрификации (активным илом)	$10^5 - 10^6$	$5 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^6$
После нитрификации и фильтрации	$5 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^5$	$10^4 - 10^6$

Таблица 7
Прозрачность (проницаемость) сточных вод в зависимости от их обработки на предшествующих стадиях

Технологическая линия обработки	Основные показатели качества сточной воды, мг/л				Прозрачность обработанной воды без фильтрования пробы, %/см
	ВВ	БПК	ХПК	Азот общий	
АИ или ПО + биофильтр для удаления С	< 30	< 30	30-90	30-55	40-55
АИ + Ф	< 10	< 15	35-70	25-50	50-60
АИ с нитрификацией или ПО + 2 биофильтра для удаления С и нитрификации	10-25	5-15	30-50	20-30	55-65
АИ + дефосфатация	10-25	10-20	30-70	30-55	50-60
АИ с нитрификацией, денитрификацией и дефосфатацией	10-20	5-15	20-45	10-20	60-70
АИ с нитрификацией + денитрификацией + дефосфатацией + Ф	< 10	< 5	20-35	< 5	60-75
ПО + 3 биофильтра для удаления С, нитрификации и денитрификации	10	< 10	20-40	< 10	60-75
Мембранный биореактор Ultrafor	< 2	< 3	20-30	< 5	70-80

Примечание: АИ — активный ил, Ф — третичная фильтрация, ПО — первичное отстаивание



2.3.2. Бактериологические подсчеты

Бактериологические подсчеты в ГСВ, хотя и более легкие, чем подсчеты вирусов или простейших, еще достаточно несовершенны, и основной проблемой является отбор проб (см. гл. 5, п. 2). Кроме того, число бактерий в ГСВ подвержено естественным колебаниям в зависимости от гидравлического режима в сетях водоотведения, и эти изменения выявляются как на входе, так и на выходе со стадии обеззараживания. Действительно, определить реальное положение дел и проверить эффективность обеззараживания можно только с помощью статистического анализа при условии правильной интерпретации получаемых результатов.

В табл. 8 приведен анализ статистических данных по взятым за 4 мес (70 значений) пробам в отношении количества фекальных и общих колиформ в обрабатываемых ГСВ на одной станции до и после их обеззараживания с помощью УФИ. В зависимости от способа представления результаты имеют отклонения в 1-10 раз

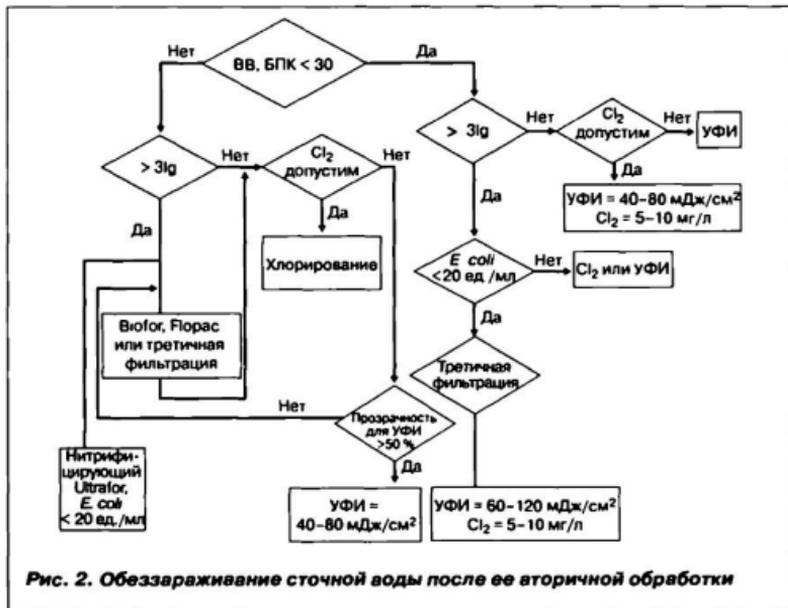


Рис. 2. Обеззараживание сточной воды после ее вторичной обработки

(см. среднее геометрическое и 95%-ю достоверность; последнее означает действительность величины в течение 95 % времени). Все способы представления данных сосуществуют и являются оправданными с большей или меньшей степенью надежности, требующейся для обеззараживания.

Таблица 8

Статистический анализ результатов обеззараживания

	Количество общих колиформ (на 100 мл)			Количество фекальных колиформ (на 100 мл)		
	На входе	Обработанная вода	Эффективность, I_{95}^1	На входе	Обработанная вода	Эффективность, I_{95}^1
Среднее геометрическое	$3 \cdot 10^4$	48	2,8	$7,6 \cdot 10^2$	8	3
Медиана	$2,5 \cdot 10^4$	64	2,2	$8,3 \cdot 10^2$	10	3
Среднее	$5,6 \cdot 10^4$	109	1,8	$1,6 \cdot 10^3$	33	1,8
80%-я достоверность	$9,4 \cdot 10^4$	201	1,8	$2,2 \cdot 10^3$	42	1,8
95%-я достоверность	$2,0 \cdot 10^5$	402	2,5	$6,7 \cdot 10^3$	118	2,5

¹ Эффективность = снижение численности микроорганизмов

2.3.3. Излечение яиц гельминтов

Яйца гельминтов (глистов — см гл 6, п 2, табл 5, и п 3 2.5) особенно хорошо защищены и поэтому не уничтожаются многими средствами обеззараживания (химическими или УФИ) в дозах, рекомендованных для других патогенных микроорганизмов, однако ВОЗ рекомендует их удаление по меньшей мере до 1 яйца на 1 л сточных вод при любом повторном использовании этих вод в сельском хозяйстве

Удаление яиц гельминтов достигается физическим их захватом на различных стадиях физико-химической или биологической обработки, и часто, когда заражение исходной сточной воды значительно, является необходимой стадия третичной фильтрации для того, чтобы можно было гарантировать соблюдение норм ВОЗ в течение более чем 95 % времени (табл. 9)

Таблица 9
Концентрация яиц гельминтов в ГСВ после различных стадий обработки (пример Мексики)

Сточная вода	Яйца гельминтов (количество в 1 л)
Исходная необработанная	10–30
После первичного отстаивания	5–10
После первичного отстаивания с физико-химической обработкой	2–5
После вторичной обработки активным илом	< 1–3
После вторичного фильтрования	< 1

3. Примеры типичных технологических линий обработки ГСВ

Для иллюстрации сформулированных ранее в этой главе соображений ниже приводятся краткие описания технологических линий обработки ГСВ недавно построенных компаний «Дегремон» очистных сооружений производительностью от 20 тыс до 2,7 млн ЭЖ, которые существенно различаются целями их строительства

- от одного только удаления органических углеродных загрязнений до получения ультрачистой воды (подпитка котлов высокого давления),
- от соответствия незначительным экологическим ограничениям до интеграции в городскую среду

В табл 10 приведены основные заслуживающие интереса характеристики этих очистных сооружений, а схематические описания соответствующих технологических линий, приведенные на рис 3, 4, 6, 8, 10–17, включают

- основные процессы обработки сточной воды и осадков, а также технологии и/или технические средства компании «Дегремон». Для упрощения представленных описаний возвраты от обработки осадков приводятся не всегда;
- технические параметры, которые являются либо ожидаемыми, либо уже фактическими для этих очистных сооружений,
- комментарии, которые обращают внимание на наиболее интересные элементы описываемой станции

Таблица 10

Сводные данные по основным характеристикам двенадцати очистных сооружений, описываемых далее

Пункт/номер рисунка	Название и/или место расположения станции	Промысловая емкость ЗЖ	Степень очистки	Цель обработки (удаление загрязнений)	Технологические линии обработки ГСВ	Наличие дождевой воды	Технологические линии обработки осадков	Конечное назначение осадков	Требуется обработка воды	Примечание
П 3 1/3	-Gabal-Egypt	27 млн	Слабые	С	Первичная АИ	Нет	Образование с использованием биогаса в термических дигестерах	СХ	Да	Обеззараживание Cl_2
П 3 2/4	-Valenton 2 - Франдия	1 млн	Значительные	С + N + P	Первичная АИ Нитрификация/денитрификация	Да	Образование Сушка Пиролиз	Добавка в удобрения для СХ или термическая утилизация	Да	Частично Обеззараживание УФИ
П 3 3/6	Милан (с) Италия	1 млн	Слабые	С + N	АИ Нитрификация/денитрификация	Да	Фильтр-прессование Сушка	СХ или сушка	Да	Частично Обеззараживание УФИ
П 3 4/8	Брно Чехия	0,5 млн	Расширенные и реконструкция	С + N + P	Первичная АИ	Да с ЛБ	Образование Центрифугирование Сушка	СХ или сушка	Нет	
П 3 5/10	Далье Китай	430 000	Значительные	С + N	Первичная Биолог С + N и N	Нет	Центрифугирование	СХ	Нет	
П 3 6/11	Корк Ирландия	440 000	Значительные	С	Первичная БГД	Да с ЛБ	Образование Ленточный фильтр Сушка	СХ или сушка	Нет	
П 3 7/12	Алршир Шотландия	310 000	Слабые	С	АИ с высокой нагрузкой	Нет	Центрифугирование Сушка	Совместное сжигание или захоронение	Нет	
П 3 8/13	Густров Германия	60 000	Слабые	С + N + P	БГД	Да с ЛБ	Центрифугирование	СХ или сушка	Нет	
П 3 9/14	Валанс Франция	155 000	Средние	С + N	АИ с низкой нагрузкой	Да	Центрифугирование Сжигание	Термическая утилизация	Нет	Обработка осадков от очистных сетей канализации паса - способом Alagis и млов - способом Biopassim
П 3 10/15	Грасс Франция	23 000	Очень сильные	С + N + P	Ультро	Да	Центрифугирование Известкование	СХ	Нет	
П 3 11/16	Сенгер, Мексика	120 000	Надежность	Восстановление ультрачистой воды	АИ Декарбонизация Двухступенчатый ОО Электродеионизация	Нет	Центрифугирование	-	Да	Для повторного использования
П 3 12/17	-Merville-Bourville, Франция	95 000	Значительные	С + P	Depezier Биолог	Да	Центрифугирование Известкование	СХ или захоронение	Нет	

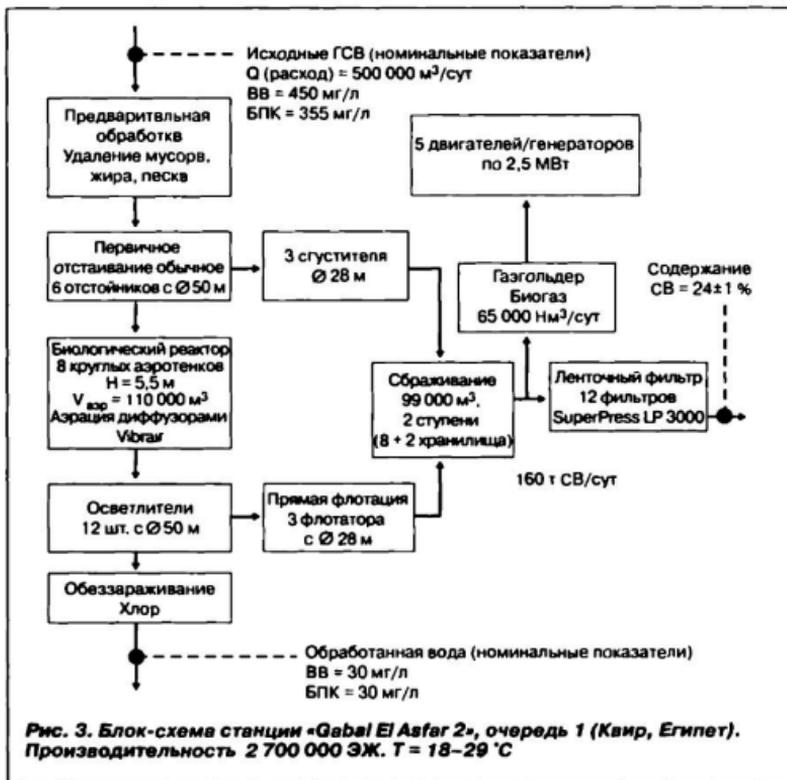
Примечание ЛБ - ливневый бассейн СХ - сельхоз кормам БГД - биореактор последовательного действия ОО - оборотный осмос

Примечания.

1. Номинальными названы значения, зафиксированные в контракте и характеризующие ГСВ на входе и/или на выходе из очистных сооружений.
2. Ожидаемыми названы значения, которые ожидаются с наибольшей вероятностью.
3. Наблюдаемыми названы значения, являющиеся статистическими результатами, которые представлены в форме среднего значения или процента достоверности (процентия)

3.1. Станция «Gabal El Asfar» (Египет)

Станция «Gabal El Asfar 2» (рис 3) является расширением сооружений «Gabal El Asfar 1» и позволяет в обычных условиях обеспечивать **удаление только органических загрязнений** с использованием активного ила при средней нагрузке
Следует отметить гибкость работы аэротенков, которые состоят из двух частей



- центральная зона 1 33 % общего объема аэротенка с возможностью использовать половину зоны в аноксидном режиме в период малой нагрузки;
 - кольцевая зона 2 67 % общего объема аэротенка, постоянно аэрируемая, но с возможностью прерывания работы при малой нагрузке
- Кроме того, аэротенки снабжены оборудованием и приборами для контроля процесса нитрификации в летний период
- Аэрация с помощью диффузоров **Vibrair** обеспечивает лучшие характеристики по эффективности передачи кислорода в воду, чем у поверхностных аэраторов
- Сбраживание осадков в восьми первичных метантенках с двумя накопителями позволяет получить достаточно газа, чтобы покрыть с помощью термических двигателей около 60 % энергетической потребности очистных сооружений

3.2. Станция «Valenton 2» (Верхняя Сена, Франция)

Станция «Valenton 2» является расширением сооружений «Valenton 1» в целях удвоения производительности. Новые сооружения (проект 2001 г.) занимают в 2 раза меньше места, чем «Valenton 1» (проект 1983 г.), хотя на них дополнительно осуществляется биологическая дефосфатация и более полно извлекается азот

Кроме этого производится обработка дождевых вод

Особенности станции «Valenton 2» (рис. 4, фото 6)

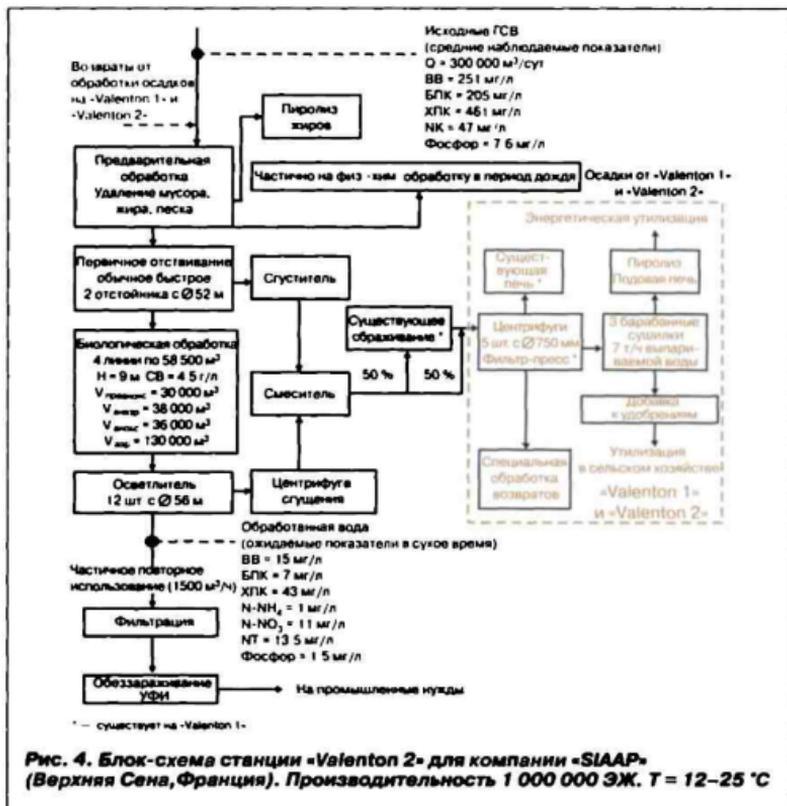
- все возвраты от обработки осадков обеих станций возвращаются на вход в технологическую линию станции «Valenton 2»;
- оригинальная форма аэротенков, работающих по принципу почти поршневого потока (вытеснения) (рис. 5);
- повышенная скорость первичного отстаивания, что позволяет сохранить в сточной воде больше частиц углерода для увеличения эффективности биологической денитрификации и дефосфатации;
- укрытие установок, требующих особого внимания (первичных отстойников, сгустителей, накопителей осадков — фото 7);
- обработка осадка различными способами (см. п. 1.3), дающая возможность
 - после сушки использовать осадки в сельском хозяйстве и вводить в качестве добавок в состав удобрений,
 - после сушки и пиролиза направлять осадки на производство энергии (см. гл. 19, п. 4.3), необходимой для сушки,
- частичное повторное использование обработанной на станции воды для промышленных нужд после дополнительной фильтрации и обеззараживания с помощью УФ



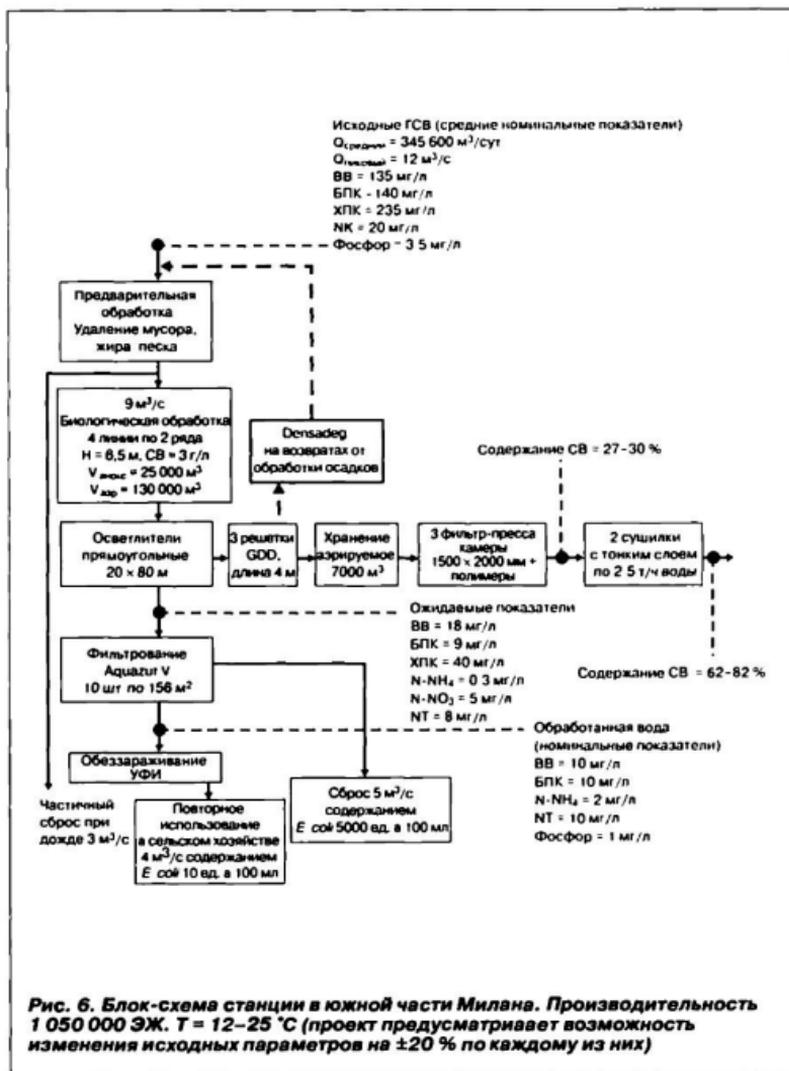
Фото 6. Фасад станции «Valenton 2» (Верхняя Сена, Франция)



Фото 7. Крытый первичный отстойник на станции «Valenton 2»



3.3. Станция в южной части Милана (Италия)



Обработка сточных вод активным илом с нитрификацией–денитрификацией происходит по схеме, показанной на рис. 7

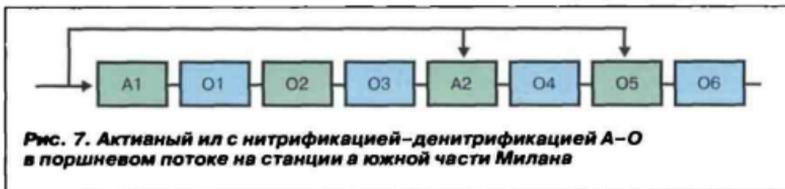


Рис. 7. Активный ил с нитрификацией–денитрификацией А–О в поршневом потоке на станции в южной части Милана

Ступенчатая подача сточных вод уменьшает концентрацию осадков, поступающих на стадию осветления, и позволяет проводить осветление с большей скоростью.

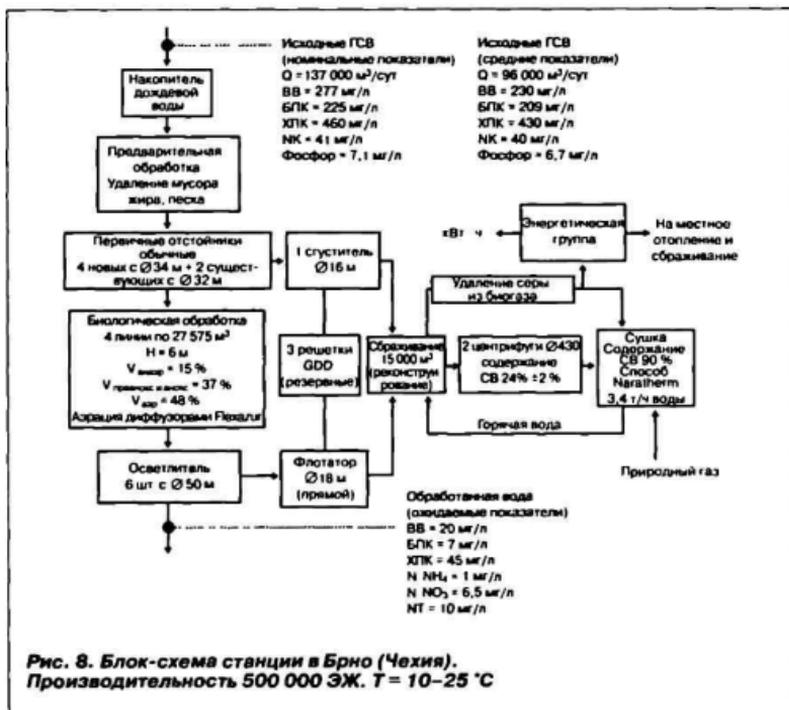
Особенности станции в южной части Милана (фото 8):

- проводится глубокое обеззараживание в целях использования очищенных вод в сельском хозяйстве,
- выполняется сушка всех осадков (5 т/ч испаряемой воды) до средней степени влажности (для возможного совместного сжигания)



Фото 8. Вид сверху станции в южной части Милана

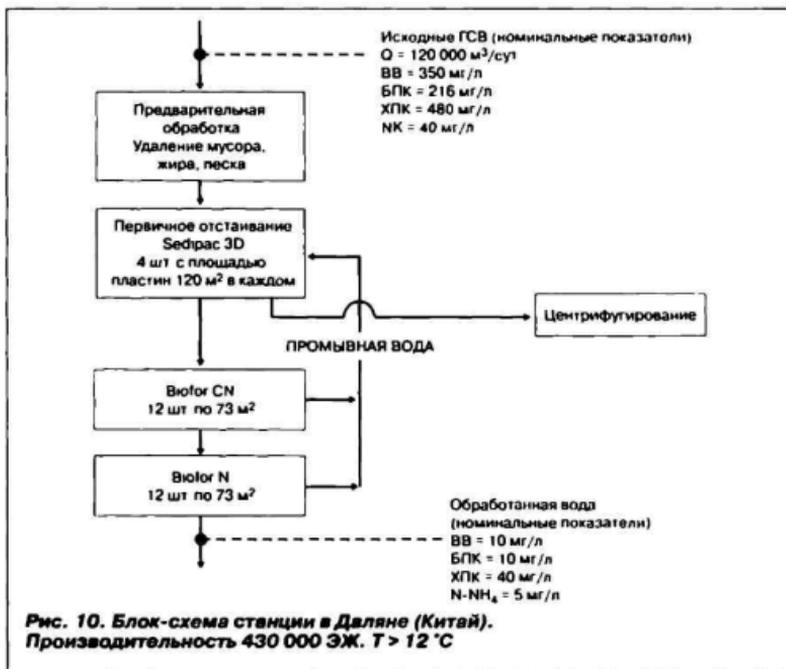
3.4. Станция в Брно (Чехия)



Особенностью станции в Брно является то, что она представляет собой результат **реконструкции и расширения** классических очистных сооружений со средней нагрузкой по способу «ISAN». На сегодняшний день она обеспечивает биологическую нитрификацию–денитрификацию–дефосфатацию сточных вод (см. схему на рис. 9). Примечательна также сушка осадков способом **Naratherm** и энергетическая утилизация биогаза.



3.5. Станция в Даляне (Китай)

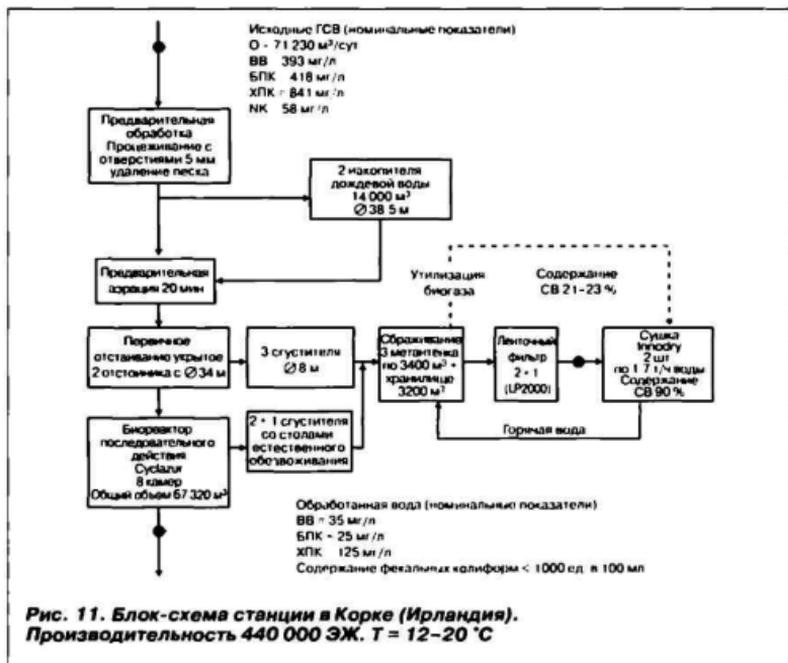


Эта новая станция (фото 9) построена в черте города и на ограниченном пространстве, что определяет включение в технологическую линию тонкослойного отстаивания и двух стадий биологической обработки на установках **Biofor CN** и **N**. Кроме того, на ней предусмотрено удаление запаха на биологическом фильтре и обработка осадков на центрифугах



Фото 9. Станция в Даляне (Китай)

3.6. Станция в Корке (Ирландия)



Станция работает со средней нагрузкой, удаление органического углерода обеспечивается только биореакторами последовательного действия **Cyclazur** (первоначальное название биореактора — **Cyclor**). В ее состав также входит метановое образование и сушка осадков на установках **Innodry**. Она отличается компактностью и построена по типу сооружений для обработки промышленных сточных вод с максимальным их укрытием композитными материалами (например, метантенки



**Фото 10. Станция в Корке: два
укрытых отстойника диаметром
34 м**



**Фото 11. Станция в Корке: три
метантенки и накопитель осадков**

из остеклованной стали; оборудование размещено по возможности снаружи; модуль сооружений с возможностью их перемещения — фото 10 и 11).

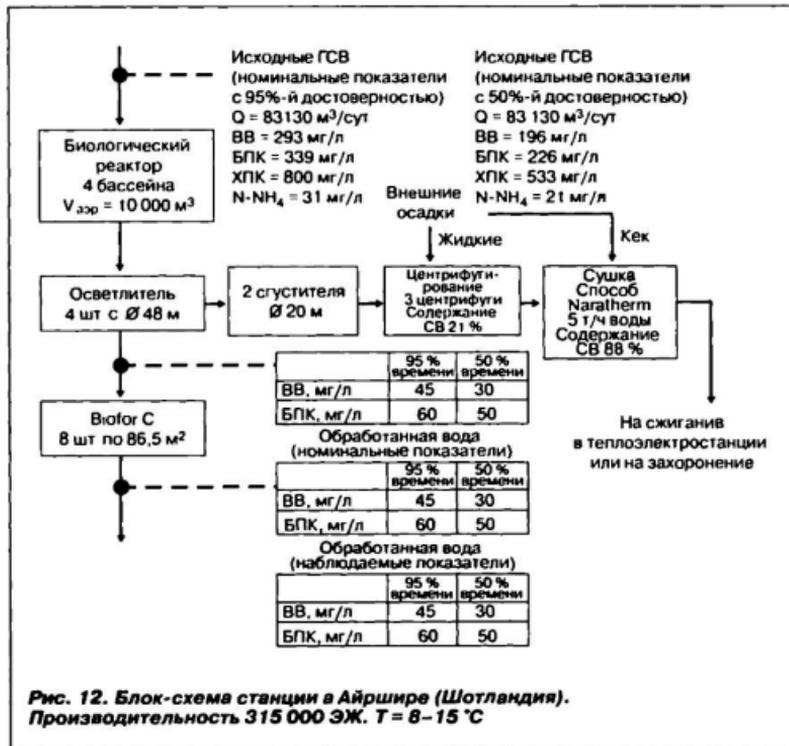
Сооружения рассчитаны на нагрузку 0,15 кг БПК/кг СВ.

Контроль за содержанием СВ в биореакторах позволяет регулировать возраст осадка, чтобы при изменении температуры избежать нитрификации

3.7. Станция в Айршире (Шотландия)

Это новая станция биологической очистки сточных вод с обработкой активным илом с высокой нагрузкой и с последующей доочисткой на установке **Biofor**. Кроме этого в ее технологическую линию входит сушка осадков (содержание СВ 88%), выполняемая перед сжиганием на тепловой станции

Примечание. Станция в Айршире принимает для обработки осадки в жидком или обезвоженном виде от двух соседних очистных сооружений, рассчитанных на 200 000 ЭЖ



3.8. Станция в Густрове (Германия)

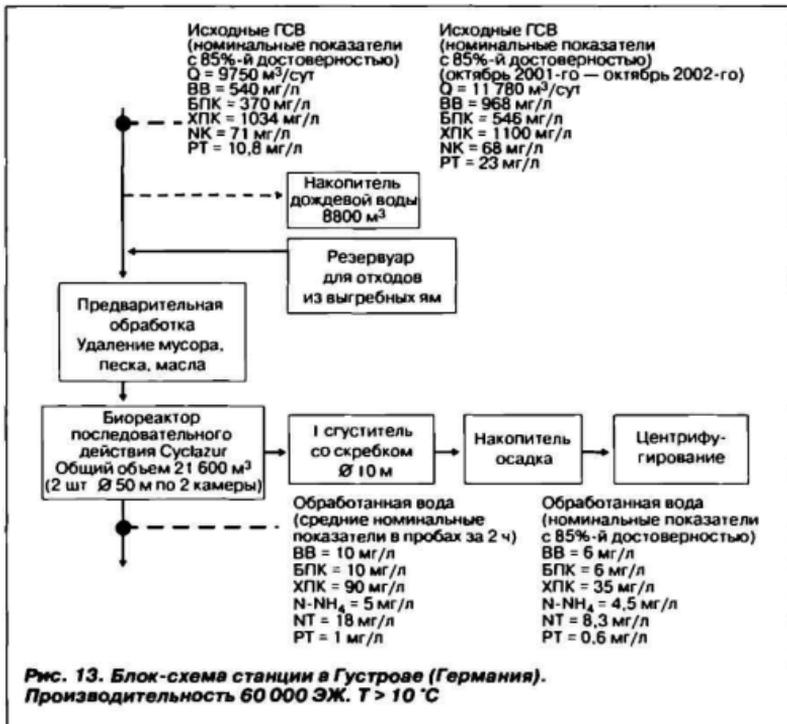
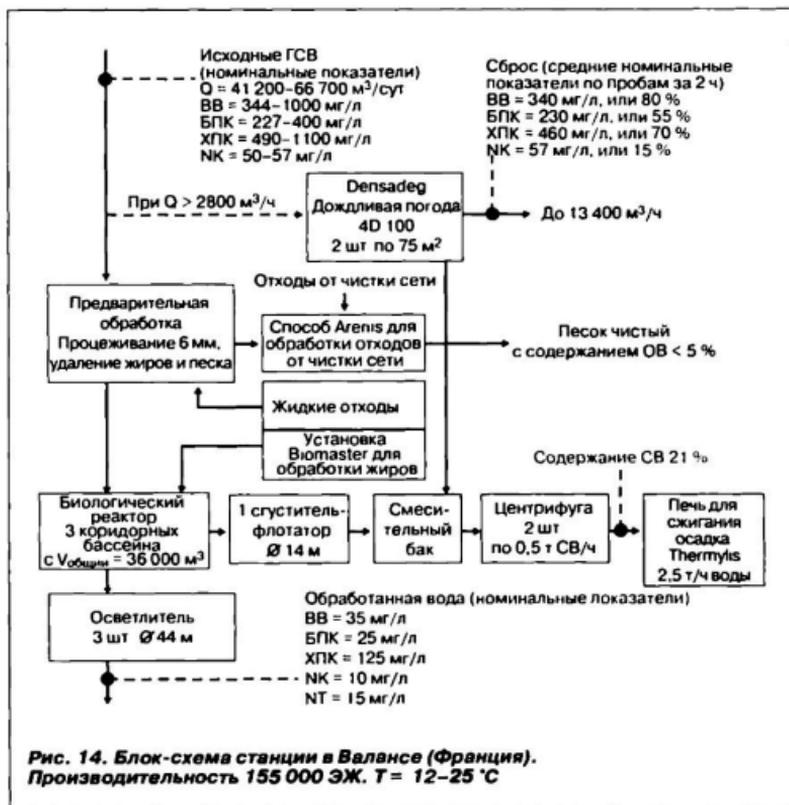


Фото 12. Станция в Густрове (Германия): вид части блока отстойника

Станция в Густове (фото 12) работает в режиме низкой нагрузки со стадиями нитрификации–денитрификации и дефосфатации (биологической и комбинированной) в реакторе *Sustrazur* и дает превосходное качество очищенной воды, несмотря на очень высокую исходную концентрацию загрязнений.

3.9. Станция в Валансе (Франция)



Станция в Валансе (фото 13) предназначена для обработки углеродных загрязнений и азота с использованием активного ила при низкой нагрузке, включая **обработку** очень значительных расходов — до 13 400 м³/ч — **дождевых вод на установке Densadeg** (см. гл. 10, п. 5) и **сжигание осадков в печах Thermylis**.

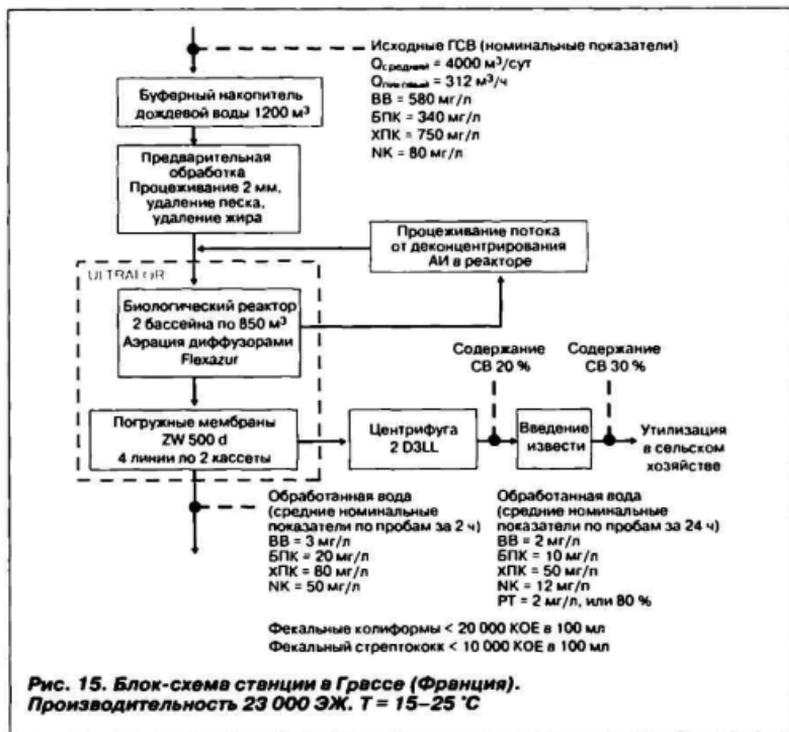
Примечательно применение на этой станции технологии обработки песка, образующегося при очистке канализационных сетей, способом *Arenis* (см. гл. 9).



Фото 13. Станция в Валансе (Дром, Франция)

3.10. Станция в Грассе (Франция)

Станция в Грассе (см. п. 1.4, фото 3) отличается своей компактностью, благодаря обработке с помощью установки **Ultrafor** (биологический реактор с низкой нагруз-



кой и погружными мембранами) она позволяет получить обеззараженную воду с очень низким БПК при практически полном отсутствии ВВ (т. е. значительно лучше-го качества, чем требуемые показатели очищенной воды).

Кроме того, использование мембранного разделения дает возможность проводить процесс денитрификации в летний период года, который был бы невыгодным в случае соблюдения только требований «Технического задания» к очищенной воде по содержанию ВВ.

3.11. Станция в Семпре (Мексика)

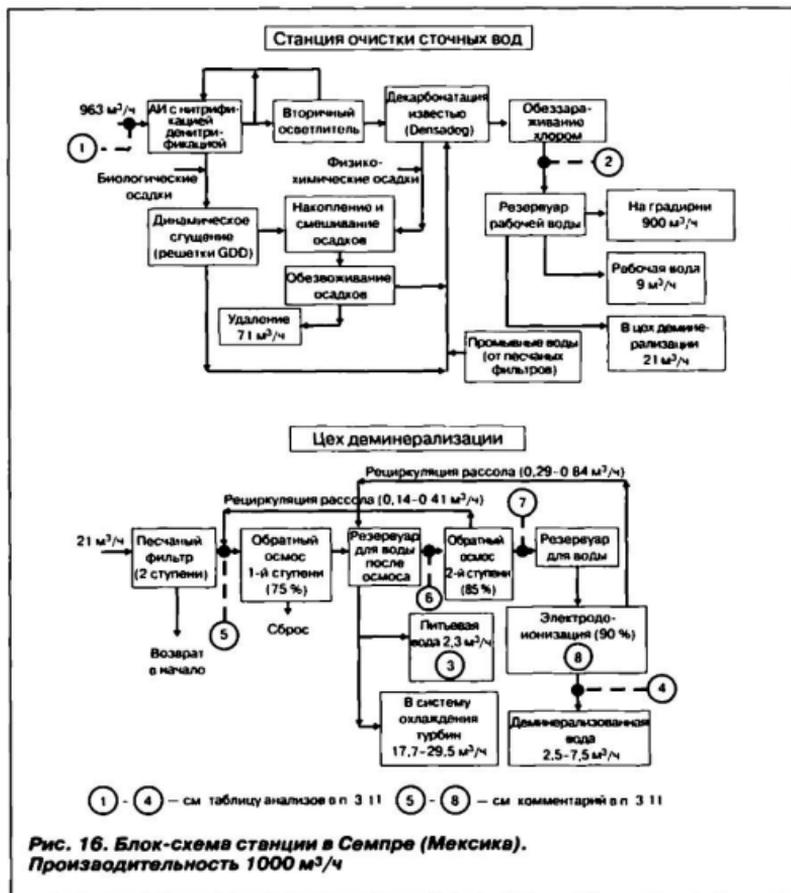


Рис. 16. Блок-схема станции в Семпре (Мексика).
Производительность 1000 м³/ч

1 Номинальная исходная сточная вода

ВВ	< 300 мг/л
БПК	< 260 мг/л
ХПК	< 800 мг/л
НК	< 70 мг/л
Фосфор	< 15 мг/л

2 Подпиточная вода для градирен (наблюдаемые значения)

ВВ	< 1 мг/л
Масла и смазки	< 0,5 мг/л
БПК	< 9,5 мг/л
Кремнезем	< 17,5 мг/л
Электропроводность	< 1600 мкСм/см
Фосфор	< 1,5 мг/л
Титр ТН	< 160 мг/л
	в пересчете на CaCO ₃
Са	< 78 мг/л
Железо	< 0,12 мг/л

3 Питьевая вода (наблюдаемые значения)

ВВ	Отсутствуют
Жиры и масла	0 мг/л
БПК	Отсутствует
Титр ТН	< 70 мг/л
Общая щелочность	< 70 мг/л
Железо	< 0,04 мг/л
Общее соледержание	< 90 мг/л
ООУ	< 1 мг/л

4 Деминерализованная вода: подпитка котельной установки (наблюдаемые значения)

ВВ	Отсутствуют
БПК	Отсутствует
ООУ	< 0,01 мг/л
Электропроводность	< 0,07 мкСм/см
Железо	< 0,2 мкг/л
Кремний	< 0,25 мкг/л



Фото 14. Станция в Семпре (Мексика)

Станция в Сепре является примером полной технологической линии обработки сточных вод с повторным их использованием для обеспечения (в качестве единственного источника водоснабжения) **всех потребностей электростанции мощностью 300 МВт**, см в гл 25, п 5 2

В технологической линии станции в Сепре следует обратить внимание

— на последовательность процессов доочистки: декарбонатация известью, обеззараживание, третичная фильтрация, двухступенчатый обратный осмос и электродеионизация, что позволяет удовлетворить все более и более строгие требования к качеству воды вплоть до обеспечения удельного сопротивления более 14 МОм·см (ультрачистая вода) и с промежуточным производством питьевой воды (туалеты, душ и т.д.).

— на то, что направляемая для доочистки вода после биологической обработки должна иметь полную гарантию качества (содержание ВВ, БПК, общий азот и т.д.), поскольку оно обуславливает должное функционирование всей линии доочистки и, следовательно, работу электростанции (имеющей лишь ограниченный запас воды необходимого качества для охлаждения и воды для подпитки котлов).

— на изменение соленосодержания воды в процессе обработки на технологической линии (отражающееся в электропроводности)

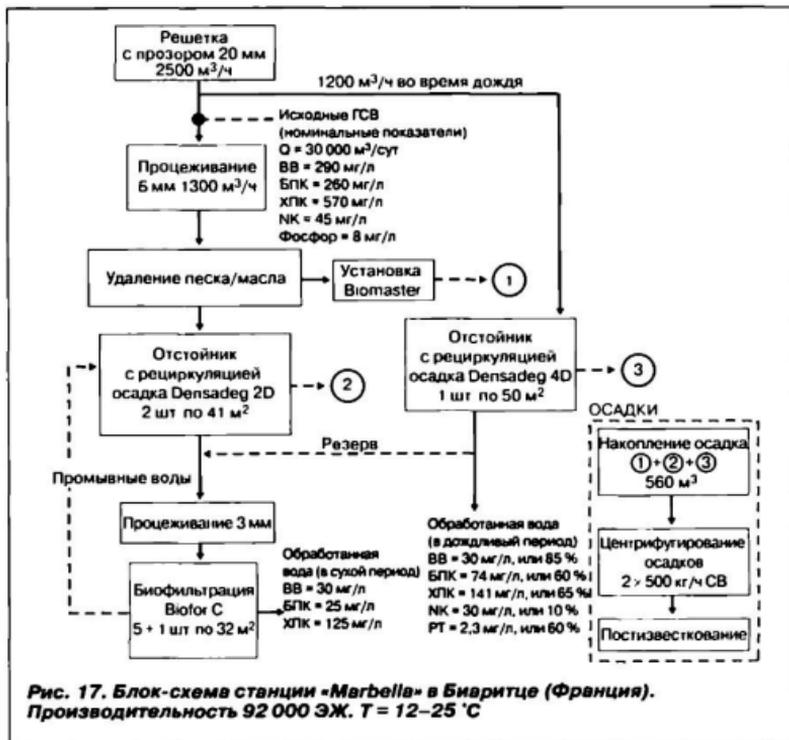
- вход на установку осмоса (5) 1730 мкСм/см,
- выход после первой ступени осмоса (6) 70 мкСм/см,
- выход после второй ступени осмоса (7). 6 мкСм/см,
- выход после электродеионизации (8) 0,07 мкСм/см

Примечание Цифры (5)–(8) совпадают с цифровыми обозначениями на рис. 16

3.12. Станция «Marbella» (Биарritz, Франция)



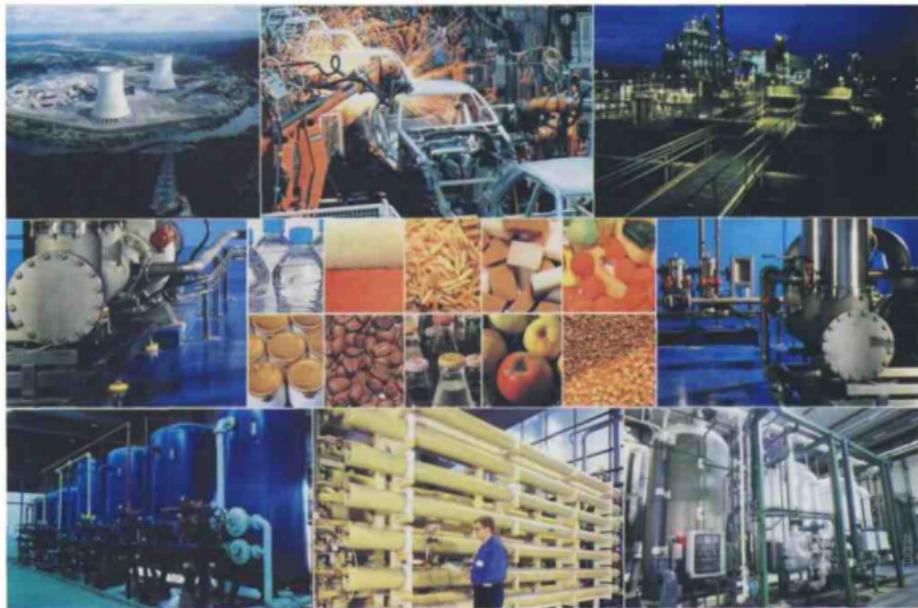
Фото 15. Станция «Marbella» (Биарritz, Франция)



**Рис. 17. Блок-схема станции «Marbella» в Бивритце (Франция).
Производительность 92 000 ЭЖ. T = 12–25 °C**

Станция «Marbella» (фото 15), построенная вместо существующей и интегрированная в жилой квартал, является примером сооружения, участвующего в улучшении окружающей среды с учетом архитектурных, градостроительных и экологических (шум, запахи) ограничений.

Используемая технологическая линия является очень показательной в отношении возможных комбинаций технологий **Densadeg** и **Biofor** в сухое и дождливое время (предусмотрен сброс в море через длинный отводной канал)



Глава

24

-
1. ВОДА ДЛЯ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК 1569
 2. КОНДЕНСАТЫ 1577
 3. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ВОДЫ 1583
 4. ПРОИЗВОДСТВО ВОД НАГНЕТАЕМЫХ
ДЛЯ ПОДДЕРЖКИ ДОБЫЧИ НЕФТИ 1599
 5. ОЧИСТКА РАССОЛОВ 1601
 6. ВОДА ДЛЯ СИСТЕМ ОХЛАЖДЕНИЯ 1602

Обработка и кондиционирование промышленных вод

В данной главе приведены описания различных технологических линий подготовки и режимов кондиционирования, которые позволяют из природной, а в некоторых случаях и из питьевой воды получить такую воду, качество которой позволяло бы применять ее для питания котлов, систем охлаждения, а также для осуществления различных производственных процессов, включая самые требовательные в этом отношении, например при производстве полупроводников или в фармацевтической промышленности, где требуется **ультрачистая вода** (см. п. 3.4).

1. Вода для котельных установок

1.1. Обработка подпиточной воды

В гл. 2, п. 3.2.5, изложены требования, предъявляемые к качеству воды, предназначенной для питания котельных установок (выдержки из европейских стандартов). Для соблюдения этих требований почти всегда необходимо проводить обработку подпиточной воды. Учитывая качество исходной воды, такую обработку зачастую начинают с осветления воды фильтрацией. Физические характеристики осветленной воды позволяют проводить ее дальнейшую обработку с помощью ионообменных смол и/или мембран для того, чтобы получить воду требуемого химического состава. В гл. 14 и 15 были описаны основные используемые технологии (мембранные или ионного обмена, а в некоторых случаях и электродиализ), которые составляют неотъемлемую часть любых технологических линий обработки подпиточной воды.

Таблица 1

Расчетные результаты способов декарбонатации и умягчения

Вариант обработки	Особенность процесса	Титр ТА, 'F	Титр ТАС (среднее значение), 'F	Общее соледержание, 'F	Величина рН	SiO ₂ мг/л
Обработка FeCl ₃ + холодное известкование + умягчение		0,5-2,0	2-4	ST - ТАС ~ 3-6	8,5-10,0	Не меняется
Обработка FeCl ₃ + холодное известкование + умягчение + обработка алюминатом натрия		0,5-2,0	2-4	ST - ТАС 3-6	8,5-10,0	2-5
Известкование + оксид магния с нагреванием + умягчение		1,0-1,5	2,0-2,5	ST - ТАС = 2,0-2,5	8,5-10,0	1-2
Карбоксильная смола + умягчение с промежуточным удалением CO ₂	Без корректировки рН	0	1-3	ST - ТАС = 1-3	6-7	Не меняется
	С корректировкой рН	0	2-5	ST ТАС = 2-5	7,5-8,5	Не меняется

Примечание ST — общее соледержание исходной воды 'F ТАС — полный щелочной титр (общая щелочность) исходной воды, 'F

Напомним, что 1 'F = 10 мг/л в пересчете на CaCO₃ = 1/5 мг-экв/л

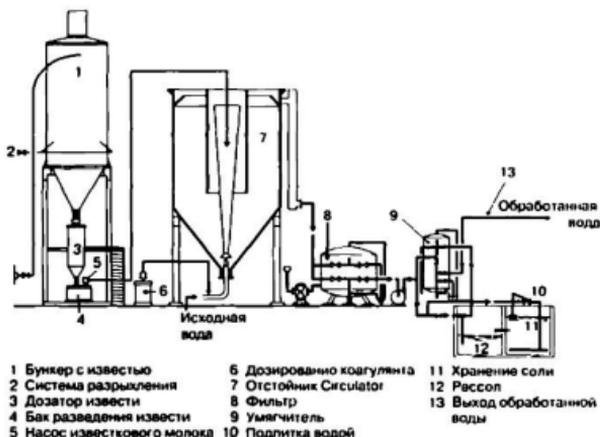


Рис. 2. Декарбонатация известкованием и умягчение на ионообменной смоле

1.1.2. Технологические линии полной деминерализации (для котлов среднего и высокого давления)

Если описанные в п. 1.1 1 виды обработки не дают нужного результата, необходимо провести полную деминерализацию подпиточной воды с помощью ионного обмена или обратного осмоса

В зависимости от состава исходной воды, давления и типа котла необходимо выбрать одну из технологических линий, приведенных в табл. 2

Если, несмотря на минимальные значения титра ТАС, требуемое значение отношения $\frac{\text{SiO}_2}{\text{ТАС}}$ не достигнуто, в обработку необходимо внести поправки, чтобы установить соответствующее соотношение между содержанием кремния и щелочностью котловой воды

Все данные в табл. 2 приведены в качестве ориентировочной информации. Они могут оказаться труднодостижимыми для минерализованной, загрязненной воды или воды, которая прошла недостаточную предварительную обработку

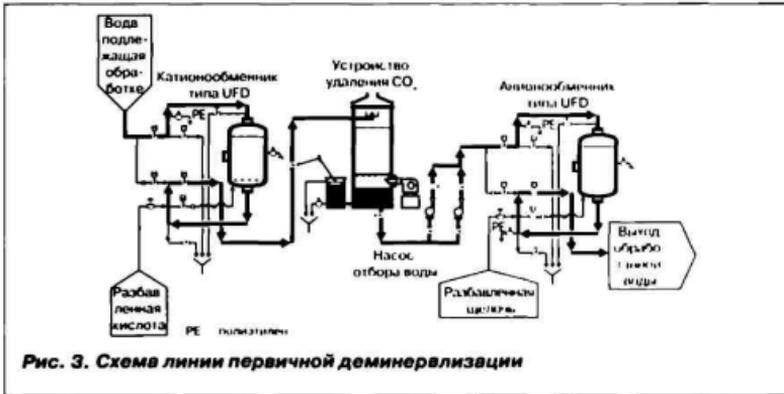
На рис. 3 показана схема технологической линии, в состав которой входят ионообменные аппараты (ионообменники) с сильнокислотным катионитом и сильнощелочным анионитом и устройство удаления CO_2 . Это самая простая технологическая линия деминерализации

Технологическая линия полной деминерализации воды, предназначенной для питания котлов высокого давления, может включать

— **предварительную обработку**: осветление и декарбонатацию с последующей фильтрацией.

Таблица 2
Технические характеристики установок для полной деминерализации воды

Вариант процесса	Удельное сопротивление, КОм · см	Кремнезем, мкг/л
1. Первичная деминерализация с прямоточной регенерацией	От 50 до 1000	От 100 до 500
2 Первичная деминерализация с противоточной регенерацией (UFD и т. д.)	От 500 до 2000	От 20 до 100
3. Первичная деминерализация в непрерывном режиме	От 500 до 2000	От 20 до 100
4 Деминерализация с обратным одноступенчатым осмосом	От 50 до 300	От 100 до 1000
5 Деминерализация с обратным двухступенчатым осмосом	От 300 до 1000	От 10 до 100
6 Первичная деминерализация (1, 2, 3) с последующим окончательным катионированием	От 1000 до 3000	От 20 до 500
7. Первичная деминерализация (1, 2, 3, 4, 5) с последующей обработкой на смешанном слое или линия доочистки или электродеионизация	От 5000 до 20 000	От 2 до 20

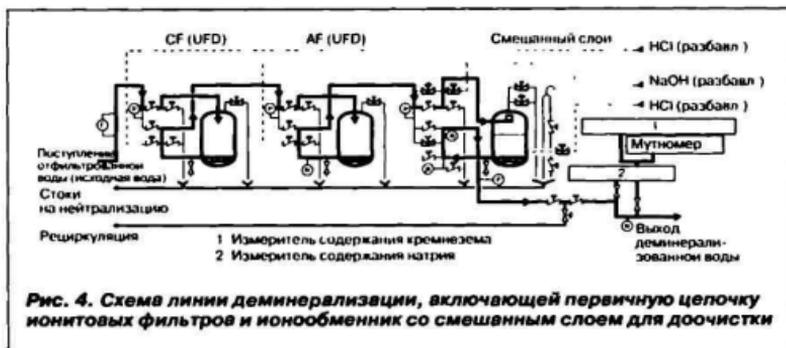


— первичную цепь ионообменных аппаратов в следующем обязательном составе

- либо один ионообменник с сильным катионом (CF — от фр. *cation fort*) и один ионообменник с сильным анионом (AF — от фр. *anion fort*) и, возможно один ионообменник со слабым катионом (CF — от фр. *cation faible*) и один ионообменник со слабым анионом (AF — от фр. *anion faible*) При этом между



Фото 1. Котельная установка для «CPCU» («Compagnie parisienne de chauffage urbain» — «Парижская компания городского отопления», район Сент-Уан, Сена-Сен-Дени, Франция). Производительность 13 800 м³/сут



катионообменником и анионообменником часто устанавливают устройство удаления CO_2 .

- либо установка обратного осмоса с одной или двумя последовательными ступенями

Вода, обработанная в такой технологической линии, будет иметь удельное сопротивление выше 50 КОм/см, кроме того, она будет очень прозрачной (мутность < 0,1 NTU), без содержания органических веществ (ОВ, т.е. содержание общего органического углерода (ООУ) < 0,5 мг/л).

- вторичную цепь ионообменных аппаратов, включающую либо один ионообменник с сильным катионитом и один ионообменник с сильным анионитом,



либо ионообменник со смешанным слоем, либо только один ионообменник доочистки с катионитом, либо одну установку электродеионизации (см гл. 15). В результате удельное сопротивление получаемой воды будет составлять выше 5 МОм·см.

— **химическое кондиционирование**

На рис 4 показана технологическая линия полной деминерализации воды для атомной станции, в которой выполняется первичное катионирование–анионирование с противоточной регенерацией, а также обработка на смешанном слое для доочистки

На рис 5 показана другая линия обессоливания, в которой применяются более современные технологии. Необходимо отметить, что в этой линии используются только физические процессы, в результате сброс вредных веществ в окружающую среду ограничен солевыми растворами и, следовательно, сведен к минимуму

1.1.3. Установки дегазации

Для удаления кислорода из подпиточной воды применяют дегазацию, которую можно проводить либо физическим способом с помощью вакуумных, термических дегазаторов (см гл 16, пп. 1 и 3) или дегазационных мембран (см гл. 3, п. 9 4.2), либо химическим способом, используя восстановители кислорода (обычно на стадии доочистки) или каталитические смолы (см гл 3, п 11 2.5)

Удаление углекислого газа всегда проводится физическим способом (воздушной отгонкой)

Самые распространенные аппараты — **термические дегазаторы** (или паровые стрипперы). Обычно их рабочая температура находится в диапазоне от 105 до 140 °С,



а емкость резервуаров рассчитывается с учетом 15–60-минутного накопления воды при номинальной производительности

Конденсат, свободный от кислорода, направляется прямо в накопительный резервуар, а конденсат, загрязненный O_2 , должен проходить дегазацию вместе с подпиточной водой (рис. 6)

1.2. Кондиционирование воды для котельных установок

Обработка и кондиционирование воды предназначены для решения трех основных задач

- поддержание нормального теплообмена путем предотвращения появления отложений и накипи на стенках оборудования,
- защита от коррозии,
- обеспечение высокого качества производимого пара

Установки обработки воды обеспечивают очистку и дегазацию подпиточной воды или воды для питания котлов. Кондиционирование является **необходимым дополнением** к программе обработки воды и предусматривает введение «кондиционирующих реагентов» с помощью устройств дозирования.

Среди наиболее часто используемых реагентов можно назвать следующие

- **фосфаты**: оказывая влияние на щелочность воды, они нейтрализуют ее жесткость, образуя трехкальциевые фосфаты — нерастворимые соединения, которые можно диспергировать и выводить через сливные донные отверстия или путем постоянных сливов. Для систем, в которых величина титра ТН подпиточной воды не превышает $1^\circ F$, фосфаты используются для регулирования щелочности или величины рН котловой воды и, следовательно, позволяют предотвращать кислотную или щелочную коррозию внутренних стенок котла. Часто в системы также добавляют **натуральные и/или синтетические диспергирующие реагенты**, а именно:

- **натуральные полимеры**: лигносульфонаты, танины,
- **синтетические полимеры**: полиарилаты, акрилат/стирол-сульфонатные сополимеры, которые также могут играть роль комплексообразующих агентов,
- **комплексообразующие агенты**: такие комплексоны, как ЭДТК (этилендиаминтетраацетат), которые позволяют удерживать загрязняющие вещества в растворе,
- **органические фосфаты**, которые вызывают ингибирование с пороговым эффектом;
- **восстановители кислорода**. сульфит натрия, кислые соли сернистой кислоты, танины, гидразин, карбозиды, производные гидросиламина и др. Такие восстановители, катализируемые или нет, позволяют проводить обратные процессы (например, переводить Fe_2O_3 в Fe_3O_4), восстанавливать растворенный кислород, а также в некоторых случаях пассивировать металлические поверхности. Выбор и дозировка восстановителей зависят от наличия устройства термической дегазации, а также от дальнейшего использования пара (некоторые продукты, такие как гидразин, запрещены для использования в пищевой промышленности).

- **противо вспенивающие средства** или реагенты, препятствующие увлечению воды паром в паротводную трубку, представляющие собой смеси поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые изменяют поверхностное натяжение

жидкости, не допускают образования пены, а также препятствуют захвату паром водяных капель

2. Конденсаты

Обработка конденсатов выполняется для удаления:

- продуктов коррозии из систем, в которых циркулируют пар и конденсат,
- солей, появляющихся при возможном поступлении в систему неочищенной воды для компенсации утечек конденсата,
- загрязняющих ОВ, появляющихся в результате протечек технологических теплообменников (например, в нефтяной промышленности это может быть конденсат нагревательных устройств)

Различают следующие виды конденсатов

- конденсаты котлов высокого давления, которые, будучи нейтральными, в качестве обработки требуют доочистки и кондиционирования,
- конденсаты котлов низкого давления, всегда требующие щелочного кондиционирования, а также очистки при наличии загрязняющих веществ

2.1. Конденсаты котлов высокого давления

2.1.1. Обработка

Выбор технологии обработки конденсатов зависит от следующих факторов

- качество конденсата,
- нормативные требования, установленные изготовителями котельного оборудования,
- требования эксплуатирующих предприятий

Способы обработки конденсатов многообразны, обычно они включают фильтрацию и деминерализацию. Таким образом, основное оборудование — фильтры и ионообменники, применяемые отдельно или в различных комбинациях.

Примечание В некоторых случаях ионообменники могут быть успешно заменены на аппараты электродеионизации.

2.1.1.1. Фильтрация на одноразовых картриджах или промываемых фильтрующих элементах

Такие фильтры удерживают взвесь загрязняющих веществ, в частности оксиды металлов, размер частиц которых превышает номинальный порог фильтрации, составляющий обычно несколько микрон (от 5 до 20 мкм).

2.1.1.2. Деминерализация путем скоростной фильтрации непосредственно на смешанном катионитно-анионитном слое

Перед прохождением через смешанный слой (фото 2) конденсат не подвергается предварительной обработке, поэтому смешанный слой ионитов должен удалять различные загрязнения — не только растворенные соли (поступающие вместе со случайной водой в конденсатор), но и ВВ (продукты коррозии, оксиды железа и даже катионы металлов Cu, Ni, Zn), а иногда и незначительные следы углеводородов. Эффективность фильтрации, происходящей при скоростях 80–120 м/ч, варьируется от 50 до 90 % в зависимости от размера частиц и режима работы.



Фото 2. Установка деминерализации конденсата на смешанных слоях на передвижной грузовой платформе на электростанции в г. Альберта (Канада). Производительность блока 23 540 м³/ч

Для того чтобы выдержать потерю напора, вызванную высокой скоростью фильтрации и забиванием фильтра, ионообменные смолы должны быть особо прочными. Чаще всего они являются макропористыми и изготавливаются из материала *tough gel* — высокопрочного вязкого геля (см гл 3)

Обычно такие смолы промываются и регенерируются во внешней (по отношению к рабочим фильтрам) системе обработки. Смолы транспортируются в эту систему водой, благодаря чему удается избежать попадания в котел кислот или щелочей, используемых во время проведения регенерации.

Конструкторы атомных реакторов, работающих на напорной воде, предъявляют очень строгие требования к содержанию натрия в циркуляционной воде (например, требуемое содержание $\text{Na} < 0,2 \text{ ppb}$). Если перед регенерацией разделение катионитов и анионитов не проходит полностью (а разделение никогда не бывает идеальным), то катиониты, удержанные в анионообменной смоле, при регенерации переходят в Na -форму и выделяют этот ион в течение рабочего цикла фильтра со смешанным слоем ионитов, что не позволяет получить требуемое качество воды на выходе.

Поскольку солесодержание конденсатов незначительно, то длительность рабочих циклов между двумя последовательными стадиями регенерации смол очень велика. В результате вторичные загрязнения, присутствующие в конденсатах даже в минимальных концентрациях, накапливаются в количествах, способных затруднить классификацию (разделение) смол после их переноса во внешнюю систему регенерации.

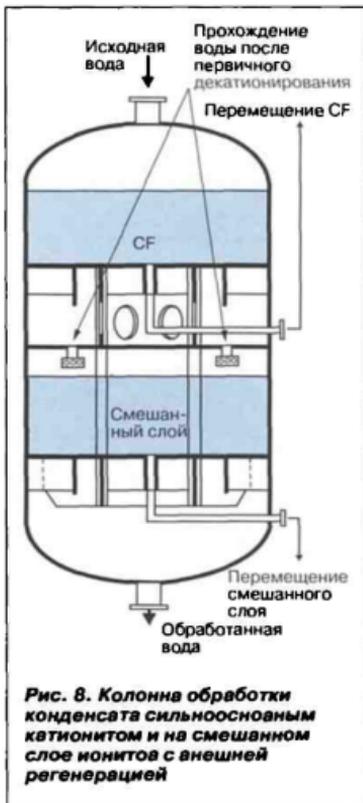


Поэтому были предложены способы, которые либо сохраняют проскок ионов, вызванный «перекрестным загрязнением» (когда смолы недостаточно хорошо регенерируются из-за плохого их разделения перед регенерацией), либо улучшают процесс их разделения. В них используют

- дополнительные реагенты в больших дозах (аммиак, известь при применении способа «Calex», соду),
- несколько относительно сложных смол,



Фото 3. Применение тройного слоя смол (три пласта) для обработки конденсата на атомной станции «Doël III» в Бельгии. Производительность установки обработки конденсата 5600 м³/ч



— трехслойную систему с инертной смолой, разделяющую катионитные и анионитные смолы в фазе регенерации [этот способ чаще всего используется компанией «Дегремон» (фото 3)]

2.1.1.3. Скоростная деминерализация с использованием катионообменника и фильтра со смешанным слоем ионитов

Когда конденсаты кондиционируются реагентами с большим содержанием летучих фракций (аммиака, морфолина, циклогексилamina), а содержание солей в подпиточной воде, вводимой для компенсации утечек, незначительно, смешанный слой ионитов выходит из состояния равновесия, количество катионов, которые надо удержать, начинает значительно превышать количество анионов (не считая OH⁻). Поэтому перед смешанным слоем целесообразно установить катионообменный аппарат, который будет удалять ионы NH₄⁺ или амины, что позволяет значительно увеличить рабочий цикл фильтра со смешанным слоем. Одновременно катионообменник будет отфильтровывать продукты коррозии, ВВ и возможные следы масел, в результате чего смешанный слой станет работать только на деминерализацию и длительность циклов увеличится.

Чтобы сократить капитальные затраты и уменьшить размеры установок, компания «Дегремон» разработала аппарат, представляющий собой колонну со смешанным

слоем, над которым располагается слой сильного катионита (рис. 8).

2.1.1.4. Фильтрация и деминерализация в одном аппарате с использованием микросмол на фильтрах с подслоем

При небольших капитальных затратах такой аппарат хорошо удовлетворяет требованиям, предъявляемым к тонкой фильтрации и деминерализации. Однако в этом случае возникают значительные эксплуатационные затраты из-за высокой стоимости порошкообразных смол, а также в связи с необходимостью частой их замены.

2.1.2. Кондиционирование

Химическое кондиционирование конденсатов котлов высокого давления выполняется путем введения в них аммиака, морфолина или циклогексилamina.

2.2. Конденсаты котлов низкого давления

2.2.1. Обработка

При отсутствии загрязнений конденсаты котлов низкого давления по своим характеристикам напоминают дистиллированную или деминерализованную воду. Кроме того, такие конденсаты могут использоваться в установках утилизации тепловой энергии

Специфика конденсатов котлов низкого давления заключается в значительном содержании железа, которое в основном присутствует в виде металлических частиц, образующихся в результате эрозии или дросселирования (из-за высокой скорости пара)

В соответствии с инструкциями изготовителя котлов и специалиста по обработке воды можно разработать технологическую линию обработки конденсата, включающую

- удаление железа на магнитных патронных фильтрах с постоянными магнитами;
- умягчение конденсата при температуре 70–90 °С на ионообменных смолах.

Если конденсаты по технологическим причинам загрязняются, они должны проходить специальную обработку, например:

- **конденсаты нагревательных систем нефтехранилищ** на нефтеперерабатывающих заводах. В зависимости от природы углеводородов очистка проводится отгонкой с паром и/или фильтрацией на антраците или активированном угле;
- **конденсаты испарения молока** или сыворотки, очистка которых после корректировки величины рН проводится с помощью биологического фильтрования и адсорбции на активированном угле, что позволяет удалить растворенную часть ХПК,

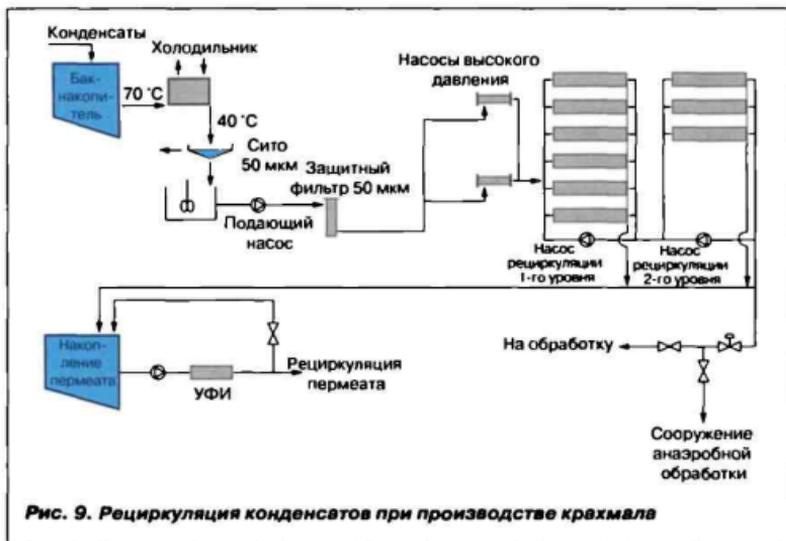


Рис. 9. Рециркуляция конденсатов при производстве крахмала



Фото 4. Завод компании «Cerestar». Установка обработки конденсата с помощью обратного осмоса

- конденсаты аммиачных испарений сахарных производств, рециркулируемая фракция которых подвергается отгонке или термической дегазации,
- конденсаты испарений пропиточных вод в производстве крахмала, а также конденсаты солодовых масс гидролизных производств. Эти конденсаты, содержащие большие количества ОВ (уксусную кислоту, спирты и т. д.), могут быть рециркулированы с помощью обратного осмоса (рис. 9 и фото 4)

2.2.2. Кондиционирование

Основной причиной коррозии трубопроводов конденсатов и систем возврата, которые обычно выполнены из черной стали, является **кислотность среды**, а также присутствие незначительных количеств кислорода. Кислый уровень pH вызван образованием углекислого газа, который переходит в пар при распаде бикарбонатов, содержащихся в воде, а также за счет горячего гидролиза карбонатов.

Этот недостаток можно исправить применением таких летучих нейтрализующих аминов, как циклогексилламин, морфолин, моно- и диэтаноламин, диэтиламиноэтанол, метоксилпропиламин, диэтилгидроксиламин, а также восстановителя кислорода или пленкообразующих веществ (октадециламина). Пленкообразующие амины изолируют металл от воды с помощью образования мономолекулярного барьера.

В большинстве случаев рекомендуется использовать смесь аминов и восстановителей, которые имеют различные коэффициенты испарения и конденсации, позволяющие эффективно защитить от коррозии короткие и длинные контуры термической установки благодаря образованию защитной пленки Fe_3O_4 .

В определенных случаях применяют аммиачный раствор и фосфат аммония, которые выделяют аммиак в котле, а также полифосфаты и пирофосфаты, которые инжигируются прямо в пар (применяется белый пар)

Реагенты кондиционирования рекуперированы, а затем за счет возврата конденсата рециркулируют в отопительную систему. Кроме того, это позволяет защитить от коррозии резервуары и трубопроводы котельной установки.

Большинство описанных выше ингибиторов коррозии, вводимых с помощью дозирующих насосов, выполняют следующие функции:

- нейтрализуют свободный углекислый газ,
- поддерживают величину pH в диапазоне от 8,5 до 9,2

Интервал значений pH может быть сокращен при наличии контактных поверхностей из сплавов меди.

2.3. Пример: водоснабжение нефтеперерабатывающего завода

Нефтехимическое производство компании «NPC» («National Petrochemical Company» — «Национальная нефтехимическая компания») в городе Табри использует жесткие и соленые подземные воды. Вода для питания котлов и подпитки технологических линий и градирен проходит декарбонатацию (1200 м³/ч), фильтрацию, обратный осмос (1000 м³/ч), а также деминерализацию (300 м³/ч на катионите-анионите).

Обработка конденсатов, которые могут содержать нефтепродукты, проводится с помощью активированного угля и смешанных слоев смол, что позволяет рециркулировать в котел воду расходом 200 м³/ч. Остаток загрязненных конденсатов поступает в сточные воды предприятия (см. также в гл. 2, п. 4.3, описание технологии обработки сточных вод этого же нефтехимического предприятия).

3. Производственные воды

3.1. Бумажная промышленность

Технологические линии осветления поверхностных вод или декарбонатации в бумажной промышленности аналогичны линиям, используемым при производстве питьевой воды или воды для питания котельных установок, а именно:

- для осветления — установки **Pulsator**, **Turbocirculator** или **Densadeg** и фильтры **Aquazur** или мембраны осветления,
- для декарбонатации — установки **Densadeg** или **Turbocirculator** и фильтры **Aquazur**.

Установка **Densadeg** позволяет получать очень хорошо осветленные воды, которые в определенных случаях (производство упаковочной бумаги, использование в системах охлаждения) не требуют дополнительной фильтрации.

3.2. Аграрно-пищевая промышленность

3.2.1. Производство пива и газированных напитков

Основные технологии обработки воды для производства пива и газированных напитков таковы:

- декарбонатация воды для производства пива и воды, предназначенной для разбавления концентратов (при производстве газированных напитков);
- деферризация, удаление марганца и азота и др. при использовании воды из скважин, загрязненных этими элементами;
- возможная частичная деминерализация воды с помощью нанофильтрации или обратного осмоса, чтобы получить производственную воду, соответствующую действующим стандартам и безупречную по своим органолептическим и бактериологическим показателям (рис. 10).

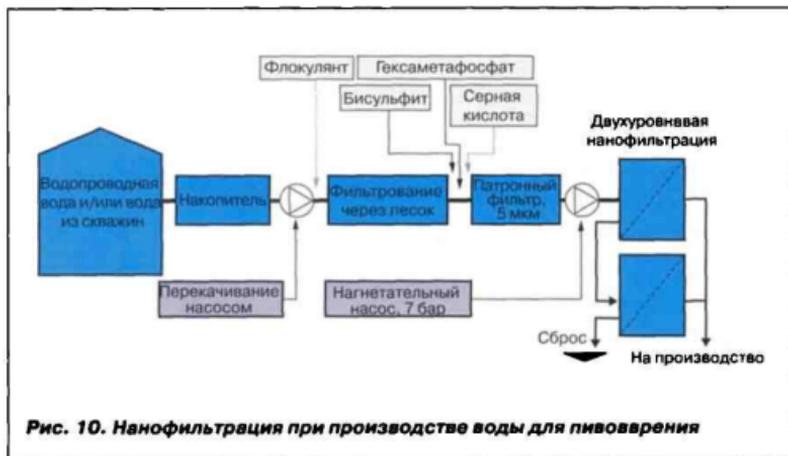


Рис. 10. Нанофильтрация при производстве воды для пивоварения

3.2.2. Минеральные воды и родниковая вода

Минеральные воды обычно имеют высокое содержание железа и магния, поэтому эти элементы необходимо удалять до бутелирования воды. Кроме того, такая вода иногда содержит небольшие количества гидрата окиси аммония. После возможного проведения вакуумной дегазации (для природных насыщенных газом вод) вода очищается от железа путем окисления воздухом, а затем обрабатывается на песчаных фильтрах. С помощью обработки на нитрифицирующем фильтре NH_3 превращается в нитрат NO_3 .

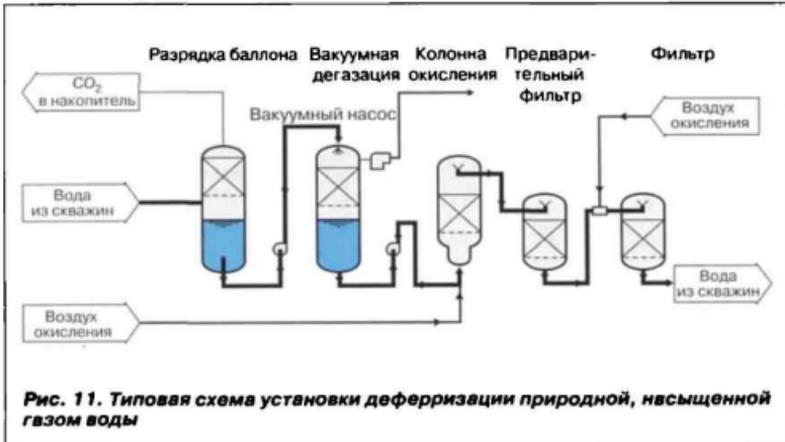
Для удаления железа и магния из родниковой и столовой вод можно применять озонирование (рис. 11)

3.2.3. Производство крахмала и глюкозы

Производства крахмала и глюкозы являются водоемкими. В них обычно используются поверхностные воды, которые требуется обрабатывать с помощью технологически глубокой очистки, предназначенной для производства питьевой воды и позволяющей удалять пестициды и микрозагрязнения.

Классическая обработка состоит из следующих стадий:

- осветление или декарбонатация известью,
- озонирование,



- фильтрование на песке,
- обработка с помощью активированного угля (удаление пестицидов),
- окончательное хлорирование,
- деминерализация на ионообменниках в целях получения воды для питания котлов

Более современная и экологически чистая технологическая линия (не загрязняющая к тому же окружающую среду, т. е. не имеющая сбросов солей) включает

- прощивание речной воды;
- мембранное осветление для получения технологической воды, а также в качестве предварительной обработки для последующего обратного осмоса,
- обработку обратным осмосом для получения котловой воды

3.3. Текстильные и красильные производства

В технологических линиях производства воды со средней производительностью для текстильных или красильных предприятий часто используют воду из скважин, которая должна быть обработана в соответствии с требованиями, предъявляемыми к воде для питания котлов низкого давления (см. гл. 2, п. 3.2)

Часто необходимо устанавливать блоки деминерализации или обратного осмоса для кондиционирования воздуха ткацких или прядильных цехов

3.4. Ультрочистая вода для производства полупроводников и фармацевтической промышленности

Ультрочистая вода необходима главным образом для производства полупроводников, а также для некоторых технологических процессов фармацевтической промышленности. Учитывая возрастающую важность систем рециркуляции воды при производстве полупроводников (рис. 12), мы сочли необходимым затронуть



вопрос **обработки сточных вод** этого производства, а также их возможное **повторное использование**.

3.4.1. Технологическая линия подготовки ультрачистой воды для производства полупроводников

3.4.1.1. Общие положения

Поскольку на разных этапах данного производства вода используется для промывки электронных компонентов, ее качество имеет решающее значение для выпуска продукции (в частности, от этого зависит качество элементов памяти, микропроцессоров и других электронных продуктов).

В данном производстве вода выполняет роль промывающей жидкости, которая расходуется в больших количествах, поэтому затраты на ее производство должны быть разумными. Учитывая тенденцию к миниатюризации электронных компонентов (см. гл. 2, п. 3.4.12, табл. 26), технические требования такого производства становятся все более жесткими по отношению к присутствию в воде растворимых и нерастворимых элементов. Таким образом, проведение необходимой обработки воды становится все более сложной задачей, которую до настоящего времени удавалось успешно решать.

Например, в 2001 г. после появления новых типов кремниевых плат диаметром 300 мм для их производства потребовалось значительно увеличить расход ультрачистой воды, с 4 до 5 м³ на 1 плату. Для получения такого количества ультрачистой воды потребовались установки производительностью 100–300 м³/ч

3.4.1.2. Технические требования и концепция результативной водоподготовки

Основные подлежащие удалению загрязнения — это ВВ, частицы, бактерии, ООУ, растворенный кислород, а также все ионы, среди которых самыми проблемными считаются кремний и бор. При этом допустимое присутствие большинства ионов устанавливается уже в ppb (микрограммах на литр) или даже в ppt (нанограммах на литр), как показано в табл. 3.

Таблица 3
Требования по ультрачистой воде для производства электронных компонентов

Характеристики воды	Единица измерения	Память DRAM (от англ. dynamic random access memory — динамическая память)					
		0,9 мкм	0,7 мкм	0,5 мкм	0,35 мкм	0,25 мкм	0,13 мкм
		1 Мбайт	4 Мбайт	16 Мбайт	64 Мбайт	256 Мбайт	1 Гбайт
Удельное сопротивление при 20° С	МОм · см	17,8	18,0	18,2	18,2	18,24	18,24
ООУ	мкг/л	50	10	5	1	1	1
SiO ₂	мкг/л	5	3	1	1	0,2	0,1
Ионы	ppt	1000	500	50	20	5–20	1–10
Кислород	мкг/л	500	100	10	10	1	1
Частицы размером < 0,05 мм	ед./л	–	–	5000	5000	1000	1000

Для выполнения требований к производству ультрачистой воды соответствующие технологические линии обработки должны состоять из нескольких стадий, среди которых мембранные технологии имеют ключевое значение.

На рис. 13, 14 и 15 показаны стандартные технологические линии очистки воды, используемые в Малайзии при производстве силиконового блока FAB (от англ. *file access block* — блок доступа к файлу) размером 180 × 130 нм, в которые входят перечисленные ниже стадии.

■ Предварительная обработка воды

Вода фильтруется через двухслойный фильтр, затем через активированный уголь, после чего подвергается умягчению на катионитной смоле. Такая обработка нацелена на снижение рисков забивания мембран и образования отложений при проведении обратного осмоса первой ступени (рис. 13, фото 5). Предварительная обработка, безусловно, зависит от качества исходной воды (в данном случае — от качества поверхностных вод).

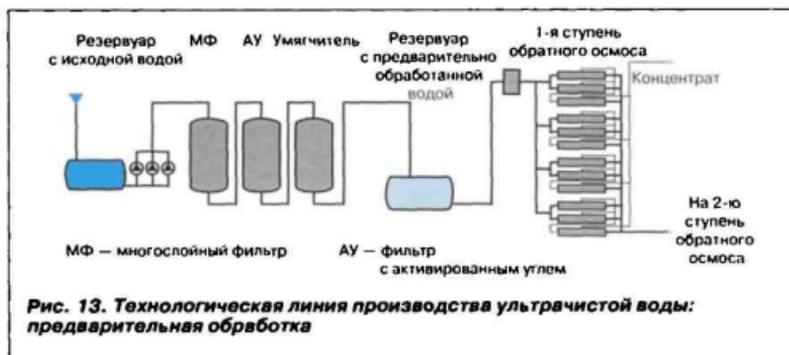
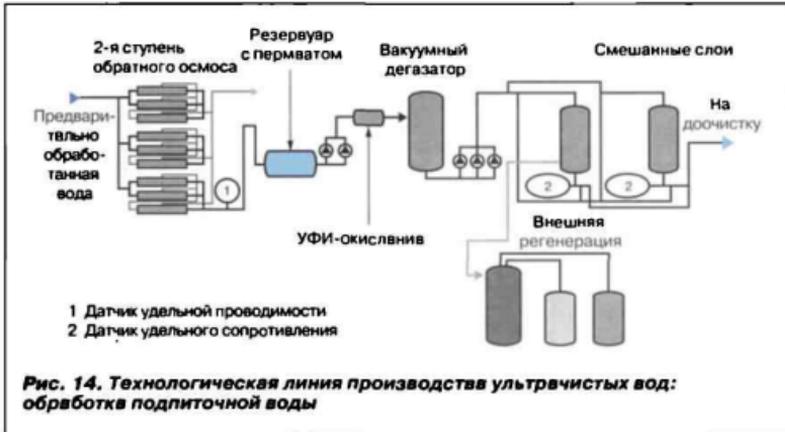


Фото 5. Установка двухступенчатого обратного осмоса. Производительность 120 м³/ч

■ Обработка подпиточной воды

Обработка подпиточной воды (рис 14) проводится на осмотической установке, работающей на второй ступени (см. гл. 3, п 9), что позволяет на этой стадии удалять от 99 до 99,9 % всех ионов, ОВ, частиц и т. д. Пермеат поступает в резервуар, где проходит озонирование (стерилизацию и окисление ОВ), а затем с помощью насосов перекачивается на аппарат ультрафиолетового излучения (УФИ) с длиной



волны 150 нм для разрушения остаточного озона и завершения окисления ООУ (см гл. 3, п. 12) После этого в вакуумном дегазаторе удаляется основная часть CO_2 и кислорода (остаточное содержание < 10 мкг/л) Остаток ионов, прошедших через



два осмотических аппарата или образовавшихся в результате окисления озоном и обработкой УФФИ, удаляется на установке со смешанными слоями ионитов с внешней их регенерацией, что позволяет проводить глубокое восстановление смол, не загрязняя воду продуктами регенерации

После прохождения аппарата со смешанными слоями ионитов вода должна иметь значение удельной проводимости, близкое к теоретическому, — 0,055 мкСм/см (удельное сопротивление 18,2 МОм·см при температуре 20 °С)

■ **Контур доочистки и распределения**

Контур доочистки (рис. 15) и распределения, замкнутый на резервуар ультрачистой воды (в атмосфере азота), позволяет обеспечивать

— постоянную циркуляцию воды в системе распределения, что препятствует появлению застойных зон (благоприятных для размножения бактерий);

— высокое качество ультрачистой воды за счет повторного УФФИ-окисления, дегазации оставшихся следов кислорода O_2 и углекислого газа CO_2 на мембране дегазации, а затем обработки в колонне нерегенерируемых смешанных слоев смол, включенной в этот технологический контур.

Фильтрация на мембранах ультрафильтрации (фото 6) непосредственно перед контролем качества воды обеспечивает окончательное удаление частиц до остаточного содержания менее 1 частицы размером $> 0,05$ мкм на 1 мл. Контроль качества воды после ультрафильтрации осуществляется по следующим параметрам ООУ, удельная электропроводность, наличие различных частиц и содержание кремнезема.

3.4.1.3. Дополнительные требования

■ **Непрерывный режим работы**

Как было отмечено ранее, непрерывный режим функционирования линии производства ультрачистой воды является необходимым условием, так как любой перерыв в ее работе может изменить физические, химические и биологические характеристики ультрачистой воды (отрыв частиц от стенок, размножение бактерий, уплотнение, размягчение смол и т. д.)

■ **Модульность**

Для обеспечения непрерывности процесса и соответствующего времени запуска в работу системы производства ультрачистой воды проектируют по модульному принципу, причем отдельные модули предварительно и максимально компактно монтируют на передвижные платформы (фото 5 и 6), чтобы:

— легко менять блоки в непрерывном режиме работы, т. е. без остановки технологической линии даже на обслуживание (модуль каждого типа находится в состоянии рабочей готовности);

— легко увеличивать производительность технологической линии (часто это предусмотрено заранее),

— **минимизировать сроки** учитывая высокую стоимость памяти DRAM, изготовители стремятся сократить до минимума время между решением производить новый продукт (или организовать производство в новом месте) и выпуском этого продукта на рынок. Таким образом, модульность и монтаж установок в цехах производителя становятся непеременимыми условиями успешной работы. Следует отметить необходимость организации специального чистого цеха («белого зала», фото 7) для монтажа модулей, обеспечения доступности ультрачистой воды для



Фото 6. Доочистка: мембраны ультраfiltrации.
Производительность 60 м³/ч



Фото 7. Сварка в чистом цехе

промывки всей системы, а также наличия азота для поддержания азотной атмосферы в некоторых устройствах

С развитием технологии требования к цехам производства электронных компонентов становятся все более строгими, что заставляет совершенствовать конструкции модулей, которые должны легко заменяться и промываться. Особенно это касается мембранных технологий, где практикуется очень строгий подход к выбору мембран, качество которых должно быть безупречно

3.4.2. Обработка сточных вод производства полупроводников

3.4.2.1. Общие положения

Обработка сточных вод производства полупроводников, которая раньше была в тени решения задачи получения ультрачистой воды, приобретает все большее значение в связи с ужесточением нормативных требований к сбросам в окружающую среду. Кроме того, появление новых типов сбросов, генерируемых инновационными производственными технологиями, также усложняет решение этой проблемы.

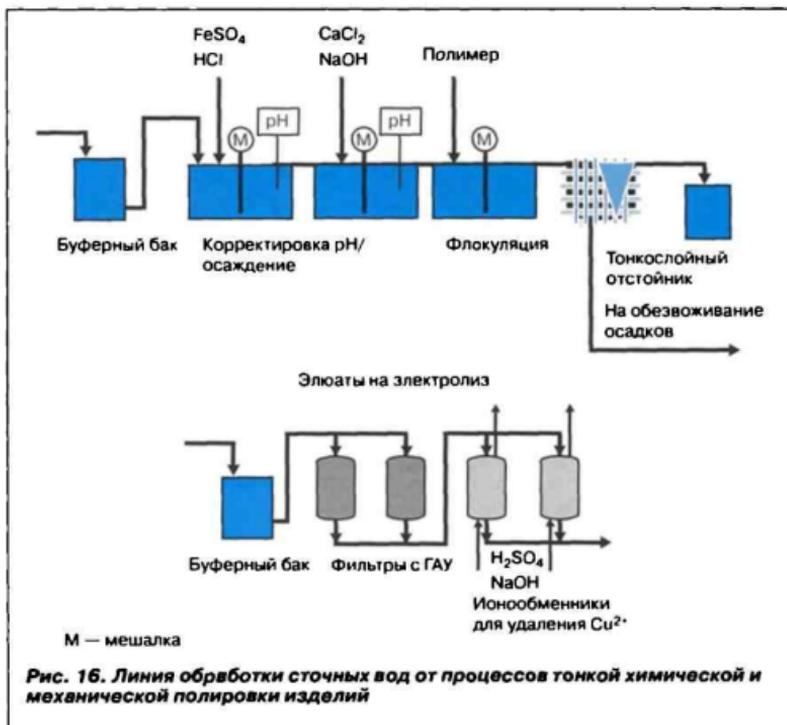
Современное производство электронных компонентов генерирует сточные воды, которые можно разделить на следующие пять групп.

- кислотные и щелочные сточные воды,
- сточные воды, содержащие фтористо-водородную кислоту,
- сточные воды от процессов тонкой химической и механической полировки изделий, содержащие ВВ, коллоидные частицы и т. д.,
- сточные воды от процессов тонкой химической и механической полировки изделий, содержащие кроме всего прочего и медь,
- сточные воды, содержащие аммиак и ОВ.

В соответствии с требованиями по защите окружающей среды сточные воды всех пяти групп должны подвергаться сначала специальной обработке, а затем направляться на общую нейтрализацию (обезвреживание).

3.4.2.2. Пример обработки производственных сточных вод

Компания «ST Microelectronics» (г. Кролл, Франция) установила у себя новую систему обработки всех вышеуказанных видов сточных вод. На рис. 16 и 17 показаны некоторые технологические линии этой системы



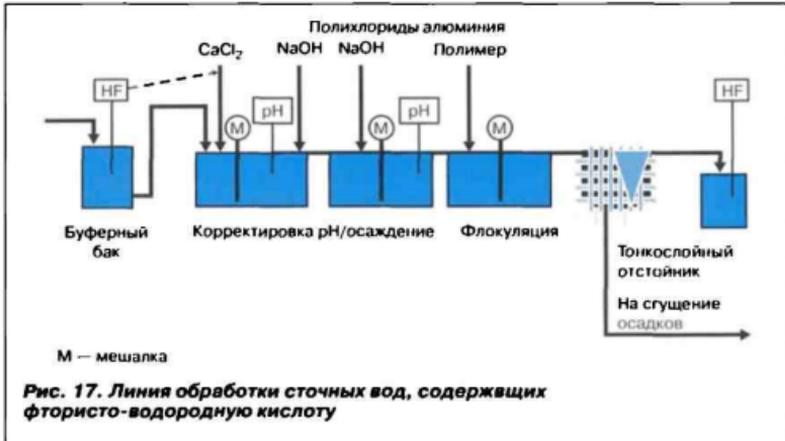
■ Обработка содержащих медь сточных вод от процессов тонкой химической и механической полировки изделий

Обработка (рис. 16) проводится с помощью коагуляции-флокуляции с последующим разделением фаз в тонкослойном осветлителе, после чего на активированном угле удаляются ОВ, а затем медь на селективном ионообменнике ($\text{Cu} < 0,1 \text{ мг/л}$)

Примечание После этого медь рекуперировать электролизом элюатов от регенерации

■ Обработка сточных вод, содержащих фтористо-водородную кислоту

Обработка (рис. 17) проводится осаждением фтористо-водородной кислоты и фосфатов путем введения CaCl_2 и последующего осветления.



■ Обработка аммиачных сточных вод

Обработка проводится биологическим способом: биофильтры **Biofor** позволяют удалять ОВ (в основном биоразлагаемые спирты), затем выполняется нитрификация и денитрификация NH_4^+ . Таким образом, процесс происходит в три последовательные стадии обработки, которая основана на использовании прикрепленных (фиксированных) микроорганизмов (см. гл. 4 и 11). После этого сточные воды смешиваются с другими потоками и поступают на нейтрализацию и окончательную фильтрацию перед сбросом в реку.

3.4.3. Повторное использование воды в производстве полупроводников

3.4.3.1. Общие положения

Вопрос повторного использования сточных вод при производстве полупроводников является предметом дискуссии. Действительно, учитывая требуемое качество воды, существуют **риски появления загрязнений**, которые могут поступать со сточными водами, даже если они прошли «хорошую обработку». Но, с другой стороны, очевидно, что в ультрачистой воде после промывки малозагрязненных электронных компонентов содержание загрязняющих веществ значительно ниже, чем в исходной воде, поступающей на предприятие (даже по сравнению с питьевой водой), поэтому отделение этих промывных вод и их **повторная очистка могут быть целесообразными с экономической точки зрения**.

Необходимо отметить, что только использование точных и надежных аналитических датчиков позволяет избежать рисков загрязнения и одновременно обеспечить экономическую целесообразность.

3.4.3.2. Требования

Учитывая вышеизложенные замечания, к обработке повторно используемых вод при производстве полупроводников предъявляются следующие требования

- применяемые технологии должны быть гибкими и надежными,

— качество и доступность ультрачистой воды должны в любом случае и постоянно сохраняться. Это означает, что любое вещество, которое нельзя полностью удалить в процессе основной обработки ультрачистой воды, должно быть удалено из контура водоснабжения — вещество следует направлять в накопитель сточных вод, предназначенный для повторного использования после соответствующей глубокой очистки

В некоторых странах в засушливые периоды года недавно стали вводить дополнительные требования, в соответствии с которыми необходимо рециркулировать до 85 % используемой в производстве воды в целях ограничения сбросов в окружающую среду. В результате компания «Дегремон» была вынуждена разработать новые системы обработки сточных вод, отвечающие подобным требованиям



На рис. 18 показаны блок-схема и водный баланс установки, которая обеспечивает рециркуляцию более 85 % сточных вод от производства FAB. Хорошо видно, что сформулированное требование влияет на всю систему и затрагивает все водные системы. Кроме того, могут быть сделаны следующие важные выводы.

- концентрация сбрасываемых сточных вод явно возрастает;
- для производства ультрачистой воды используется исходная вода другого качества (меньше солей, больше частиц и т. д.);
- любое изменение производственного процесса влечет за собой изменения в обработке сточных вод и, следовательно, в подготовке ультрачистой воды, что требует постоянного контакта между основным производством и системой получения ультрачистой воды.

3.4.3.3. Технология

Технологические линии обработки промывных вод (после проверки уровня их загрязнения) включают следующие стадии

- взвешенные и коллоидные частицы, поступающие от процессов тонкой химической и механической полировки, удаляются на мембранах ультрафильтрации,
- ионы удаляются на ионообменных смолах (линия слабый анионит + сильный катионит + сильный анионит),
- изопропиловый спирт — основное загрязняющее ОВ — удаляется на биофилтре с последующей многослойной фильтрацией, обработкой активированным углем и обратным осмосом (рис 19).

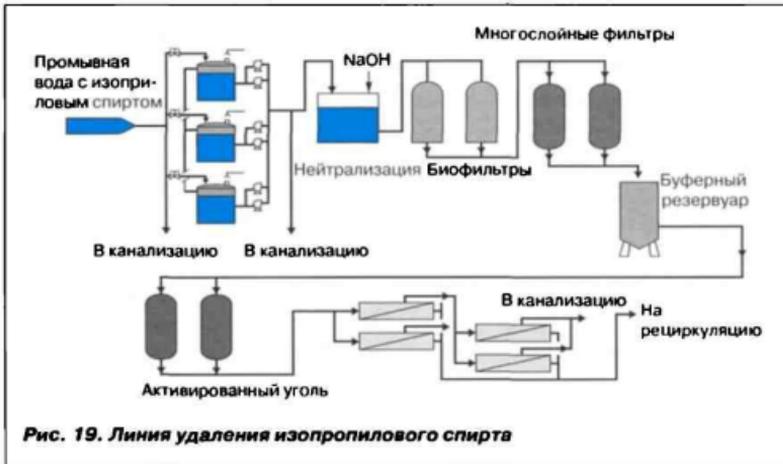


Рис. 19. Линия удаления изопропилового спирта

Обработанную таким образом воду можно подавать на вход в технологическую линию производства подпиточной ультрачистой воды

3.4.4. Воды для использования в фармацевтической промышленности

3.4.4.1. Общие положения

Требования, касающиеся качества используемой воды, существенно изменяются в зависимости от производственных технологий. Обычно различают.

- очищенную воду (PW — от англ. *purified water*),
- воду для инъекций (WFI — от англ. *water for injection*)

Качество воды для инъекций регулируется нормами GMP (от англ. *Good Manufactured Practice* — Международный стандарт по качеству продукции) в Европе и стандартами FDA (от англ. *Food and Drug Administration* — Администрация по контролю пищевых продуктов и лекарственных препаратов), принятыми в США

Следует отметить, что потребность в воде самого высокого качества характерна не только для производства электроники и в фармацевтической промышленности может составлять от 5 до 50 м³/ч

Нормативные требования GMP касаются не только конечного качества получаемой воды, но и способов обеспечения такого качества. Компания «Дегремон» решает эту задачу с помощью предварительно смонтированных компактных систем мембранного обратного осмоса, дегазации и электрической деионизации (см гл. 3, пп. 9.4.2 и 9.5.4). При этом все используемое оборудование — аппараты, датчики, системы управления и автоматического контроля — имеют необходимые сертификаты.

3.4.4.2. Требования

Требования к качеству воды, определенные для фармацевтической промышленности в законодательных документах разных стран, мало отличаются друг от друга, что иллюстрирует табл. 4, в которой сравниваются европейские и американские нормы (необходимо уточнить, что в обоих случаях в качестве исходной воды используется питьевая вода).

Таблица 4

Требования, предъявляемые к очищенной воде и воде для инъекций в фармацевтической промышленности

	Европейская фармакопея	Американская фармакопея, USP 25 (от англ. United States Pharmacopeia)
Очищенная вода		
ООУ	< 0,5	< 0,5
Другие окисляемые вещества, мг $\text{KMnO}_4/\text{л}$	< 3	-
Удельная проводимость, мкСм/см, при температуре 20° С	< 4,3	< 1,1
Микроорганизмы, КОЕ/мл	< 100 (CS-Arap)	< 100 (PC-Arap)
NO_3 , мг/л	< 0,2	-
Тяжелые металлы, мг/л	< 0,1	-
Вода для инъекций		
Требования такие же, как и для очищенной воды, кроме следующих параметров.		
- удельная проводимость, мкСм/см, при температуре 20° С	< 1,1	< 1,1
- микроорганизмы, 1 КОЕ в 100 мл	< 0	< 10
- бактериальные эндотоксины, БЕ/мл (БЕ — бактериальные единицы)	< 0,25	< 0,25

3.4.4.3. Применяемые технологии обработки

Чтобы добиться значений удельной электропроводимости ниже 1,1 мкСм/см, необходимо выполнить двухступенчатую осмотическую обработку с дегазацией CO_2 . Если питьевая вода содержит большое количество солей, то вторую ступень осмотической обработки нужно заменить электродеионизацией, которая позволяет добиться проводимости 0,5 мкСм/см. Капитальные затраты на комбинированную установку «обратный осмос + электродеионизация» (способ **Rocedia**) немного превышают сто-

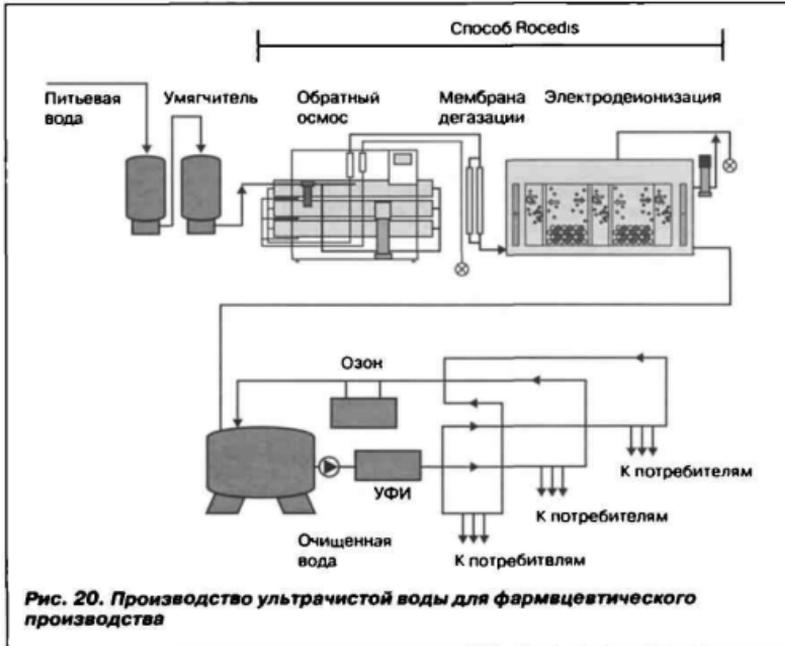
имость установки двухступенчатого обратного осмоса, а эксплуатационные расходы примерно одинаковы. Таким образом, комбинированная установка, объединяющая обратный осмос и электродеионизацию и производящая воду с оптимальными значениями электропроводимости, все чаще находит свое применение

■ Предварительная обработка

Задача предварительной обработки — защитить установку обратного осмоса, расположенную дальше по технологической линии водоподготовки. Выбор технологии предварительной обработки зависит от качества исходной питьевой воды. Часто рекомендуется применять умягчение воды на ионообменных смолах, чтобы не допустить появления отложений и загрязнения остаточными металлами (Al, Fe, Mn и т. д.) Кроме того, необходимо провести дехлорирование воды

■ Обратный осмос или комбинирование обратного осмоса и электродеионизации

Электропроводность воды на выходе зависит от двух основных параметров: электропроводности и титра ТАС исходной воды. Растворенный CO_2 (концентрация которого зависит от величины pH) не задерживается осмотическими мембранами. Поэтому необходимо либо работать при повышенном значении pH после проведения глубокого умягчения, либо использовать мембрану дегазации.



Затем необходима вторая ступень осмотической обработки или электродеионизация. Во втором варианте (рис 20) пермеат осмоса (98 % исходного потока) рециркулируется при значениях удельного сопротивления выше 16 МОм · см (или при удельной электропроводности < 0,065 мкСм/см), а оставшийся концентрированный раствор (2 % исходного потока) может быть рециркулирован. Энергия, необходимая для проведения электродеионизации (в аппарате «Солприт»), приблизительно на 20 % меньше энергос затрат, которые требуются для второй ступени обратного осмоса на установке с модулем низкого давления. Поскольку электродеионизация не позволяет полностью удалить CO₂, то пермеат обратного осмоса рекомендуется предварительно обрабатывать с помощью мембранного дегазатора.

Очищенная вода направляется в контур распределения, в котором окисляющее действие УФ и озона позволяет поддерживать очень незначительное количество ОВ и бактерий



Фото 8. Модуль распределения ультрачистой воды

3.4.4.4. Пример

Технологическая линия, изображенная на рис 20, позволяет без проблем гарантировать качество воды, соответствующее действующим нормам (табл. 5) При этом следует отметить отличные результаты по удалению эндотоксинов (0,1 БЕ/мл), несмотря на их высокое содержание в питьевой воде (\approx 20 БЕ/мл), что составляет 99 % при удалении осмосом и > 50 % при проведении электродеионизации. На фото 8 показан передвижной модуль, на котором осуществляется такая обработка

Таблица 5

Качество ультрачистой воды, полученной в технологической линии, изображенной на рис. 20

Показатели	Умягченная питьевая вода	Пермеат осмоса	Вода после электродеионизации
Удельная электропроводность, мкСм/см	\approx 700	< 5	< 0,062
Бактериальное обсеменение, число колоний на 100 мл	\approx 10 ⁴	\approx 200	< 10
Бактериальные эндотоксины, БЕ/мл	\approx 20	\approx 0,2	< 0,1

4. Производство вод, нагнетаемых для поддержки добычи нефти

Как упоминалось ранее (см. гл 2, п 3 4.7 1), технологические линии обработки воды (либо извлеченной с нефтью, либо морской воды на офшорных платформах, либо пресной воды при добыче на континенте) должны проектироваться таким образом, чтобы возможно было повторное нагнетание воды в нефтяной пласт для поддержания в нем давления и при этом исключался риск забивания пространства (ВВ или другими отложениями, продуктами коррозии трубопроводов, размножения микроорганизмов) На рис 21 показана технологическая линия **обработки морской воды**, используемой для поддержки нефтедобычи на **морской нефтяной платформе**. Она включает

- предварительное хлорирование NaClO , получаемым путем электролиза непосредственно на месте из морской воды,
- тонкое процеживание (размер отверстия сита от 100 до 250 мкм),
- флокуляцию в трубопроводе (органическим или минеральным коагулянтом);
- скоростную фильтрацию на компактных фильтрах типа **FECM** (со слоем только песка, см гл 13, п. 2.2) или **FECB** (с двойным слоем — антрацит и песок, см. гл. 13, п. 2.3), которые обычно обеспечивают удаление от 92 до 98 % частиц размером, превышающим 2 мкм (см. фото 9);
- дегазацию воды с помощью вакуумного дегазатора или газовой отгонки,
- окончательное удаление кислорода с помощью бисульфата аммония или сульфита натрия,
- обеззараживание,

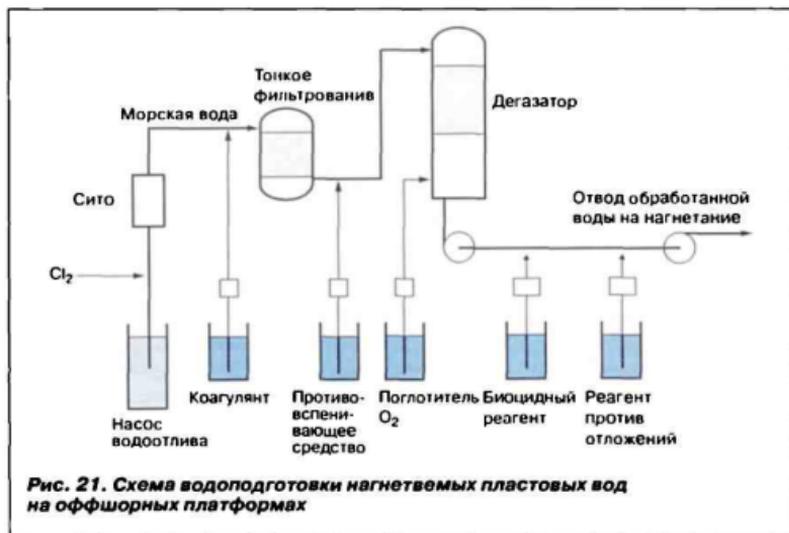


Рис. 21. Схема водоподготовки нагнетаемых пластовых вод на офшорных платформах



Фото 9. Установка фильтрации морской воды в Верхнем Звуме (Абу Даб). Производительность 6000 м³/ч

— возможную дополнительную защитную фильтрацию

По решению эксплуатационной компании **фильтрация может ограничиваться процеживанием**

Иногда требуется удалять содержащиеся в морской воде сульфаты с помощью нанофильтрации, чтобы вода была совместима с «пластовой водой» (например, если такая вода содержит большое количество ионов Sr⁺ или Ba²⁺)

На континенте технологическая линия обработки воды может быть расширена и включать отстойник, особенно при использовании прибрежных вод, которые часто содержат много ила

Дегазация кислорода обеспечивается двумя способами

— отгонка с помощью природного газа (для уничтожения газовых выделений также можно использовать устройство для отвода и сжигания попутных газов (газового факела)),

— вакуумная дегазация на одном или нескольких уровнях. Правильный расчет размеров такой установки позволяет в будущем избежать чрезмерного расходования дорогостоящего реагента-восстановителя

В некоторых случаях нужно проводить нагревание тяжелых углеводородов для их последующего извлечения из воды. Тогда в породу-коллектор **нагнетают** большое количество пара при давлении 60–150 бар, для чего используют нагревательные котлы следующих видов.

— с очень сильным выносом (увлечением воды паром в паротводную трубку) или с большим объемом слива (от 10 до 25 %), поскольку такие котлы могут рабо-

тать с очень соленой, но хорошо умягченной водой (титр ТН < 0,05 °F). В зависимости от состава воды линия ее обработки перед подачей в котлы предусматривает доочистку на карбоксильных смолах с кислотной регенерацией или на специальных смолах умягчения,

— высокого давления, которые требуют деминерализованной воды и, следовательно, применения обратного осмоса и системы доочистки (на смешанных слоях или с помощью электродеионизации).

Для двух рассмотренных случаев необходимо заметить, что если в качестве исходной воды используется вода из нефтяных скважин, то предварительно необходимо провести

— глубокую очистку от масел по типу API + флотация (API — глубокое извлечение масел в статическом отстойнике по нормам Американского института нефти) с последующей фильтрацией,

— удаление кремния, поскольку такие воды обычно имеют высокое содержание растворенного и/или коллоидного кремния. Удаление кремния (см. гл. 3, п. 2) часто комбинируется с умягчением (известкование или известкование + Na_2CO_3 и др.). Как обычно, для повторного использования вод необходимо иметь данные о составе исходной воды, так как от этого зависит грамотный выбор технологической линии обработки, что, в свою очередь, обеспечивает бесперебойное производство пара, необходимого для процесса нефтедобычи

5. Очистка рассолов

5.1. Получение очищенной соли из исходной каменной соли

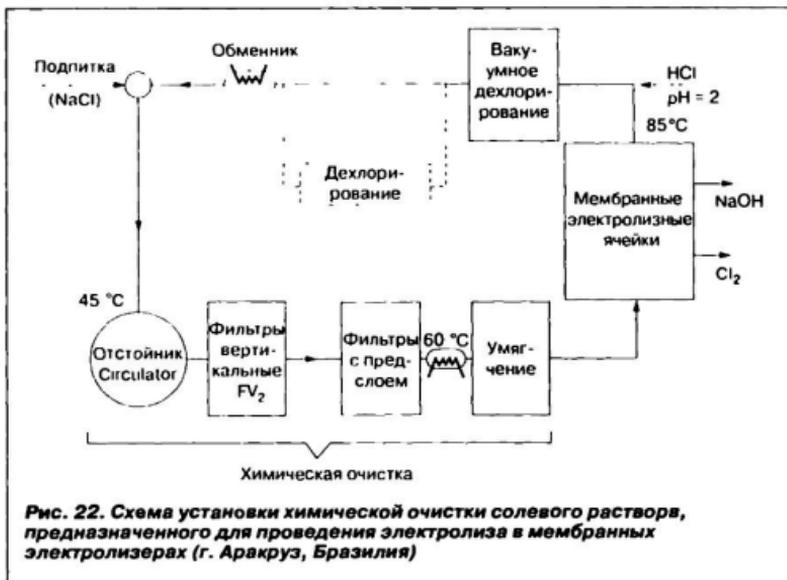
Перед проведением электролиза раствор исходной каменной соли должен пройти следующую обработку:

- осветление и дегазацию,
- осаждение солей Mg^{2+} с помощью известкования и солей Ca^{2+} посредством добавления карбоната натрия. Разделение фаз проводится в установках **Circulator**, **Turbocirculator**, **Densadeg**;
- частичную очистку от серы известкованием или с помощью хлорида кальция с рециркулирующей маточного раствора для кристаллизации в реакторах **Densadeg**

5.2. Растворы для электролизных систем производства щелочи и хлора

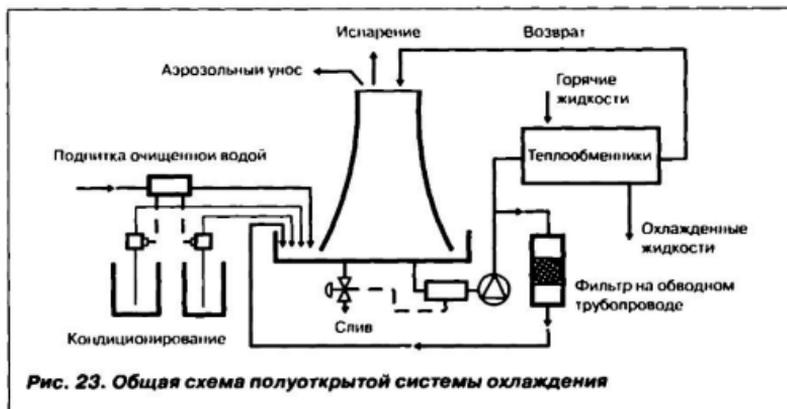
Раствор NaCl , используемый для питания мембранных электролизеров с плотностью тока до 7000 A/m^2 , должен быть очень хорошо очищен, поэтому он проходит следующие стадии обработки

- удаление сульфатов путем осаждения BaSO_4 в установке **Densadeg** (с введением BaCO_3 или BaCl_2);
- удаление следов Ca^{2+} на специальных умягчающих смолах (для снижения содержания ионов кальция до 50 мкг/л);
- вакуумное дехлорирование, часто проводимое в обводной линии, которое можно дополнить введением бисульфита (рис. 22).



6. Вода для систем охлаждения

Предприятия, использующие системы охлаждения, сталкиваются с тремя основными проблемами, которые мешают работе градирен и теплообменников



- засорение и биологическое обрастание,
- отложение накипи,
- коррозия

На рис. 23 показана полуоткрытая система охлаждения с различными установками для обработки воды и устройствами введения реагентов кондиционирования

6.1. Защита от засорений и биологического обрастания

Проводимые мероприятия по защите систем охлаждения от засорений и биологического обрастания должны носить профилактический характер в целях повышения эффективности работы этих систем, снижения стоимости их эксплуатации, а также обеспечения соответствия экологическим требованиям (см. также гл. 2 и 3)

Коллоидные вещества оказывают очень сильное негативное воздействие на работу системы охлаждения, поскольку они коагулируются на горячих поверхностях, образуя изолирующую пленку, которая служит питательной основой для биологических обрастаний. Эти процессы усиливаются в присутствии ОВ. Кроме того, коллоидные вещества способствуют образованию отложений на всех участках контура охлаждения, где скорость циркуляции воды невелика.

6.1.1. Подготовка подпиточной воды

В зависимости от степени загрязнения исходной воды для удаления из нее ОВ, а также взвешенных и коллоидных частиц можно провести следующие виды обработки:

- отстаивание без фильтрования,
- отстаивание с фильтрованием,
- фильтрование с коагуляцией на фильтре (или без нее),
- возможное окисление (NaClO , O_3 и др.)

Отстаивание с фильтрованием можно успешно заменить осветлением на мембранах.

Декарбонатация известкованием позволяет в одной установке провести отстаивание и снизить

уровень жесткости, что является существенным преимуществом (фото 10). Кроме того, такая обработка оказывает бактериостатическое воздействие (за счет повышенного уровня pH), улучшая биологические характеристики воды.



Фото 10. Атомная станция в г. Лейбштадте (Швейцария). Декарбонатация в тонкослойном отстойнике воды, поступающей из реки Рона. Производительность установки 36 000 м³/ч

6.1.2. Подготовка воды для системы охлаждения

6.1.2.1. Фильтрование на обводной линии с возможной коагуляцией на фильтре

Настоятельно рекомендуется отфильтровывать ВВ, содержащиеся в воде, циркулирующей в системе охлаждения. Расход воды, которая может быть подвергнута

фильтрации на обводной линии, составляет приблизительно от 5 до 10 % всей циркулирующей воды. Очевидно, что если в систему охлаждения попадают загрязнения (переносимый ветром песок, пыль от производственных процессов и др.) и к качеству циркулирующей воды предъявляются особые требования, то процентная доля подлежащей фильтрации воды будет намного выше. Для обработки исходной воды, обладающей высокой забивающей способностью, настоятельно рекомендуется перед фильтрацией вводить в воду органические коагулянты.

6.1.2.2. Применение органических диспергаторов

Роль диспергаторов заключается в том, чтобы поддерживать частицы во взвешенном состоянии и препятствовать образованию отложений в зонах с низкой скоростью циркуляции воды и на стенках теплообменника. Кроме того, эти реагенты помогают упорядочить формирование защитных слоев, образуемых ингибиторами коррозии, которые часто вводят одновременно с диспергаторами (см. гл. 2, п. 5).

6.1.2.3. Применение поверхностно-активных веществ

Необходимо добиваться снижения поверхностного натяжения воды, чтобы облегчить доступ к засорам и их ликвидацию с помощью биоцидных реагентов. Особенно настоятельно рекомендуется использовать эти вещества.

- при подготовке системы охлаждения к работе до начала подачи в нее воды;
- при проведении операции обеззараживания системы с помощью биоцидных реагентов;
- при чистке системы в целях удаления загрязнений (масел, жиров, углеводов и т. д.).

6.1.2.4. Применение окисляющих реагентов

Чаще всего в качестве окисляющего реагента используется хлор, вводимый в виде гипохлорита; он выполняет роль окислителя и биоцида (реагента, разрушающего живые микроорганизмы). Хлорирование обычно проводят периодически, а частота проведения этой операции может быть различной: от одного раза в сутки до четырех раз в год. Чтобы не ускорять процессы коррозии, следует избегать концентраций свободного остаточного хлора Cl_2 выше 1 мг/л.

Потребление Cl_2 может быть значительным, поскольку высвобождение ОВ, удерживаемых на поверхностях контура охлаждения, может увеличивать в 10–15 раз исходную потребность в хлоре.

Бромсодержащие реагенты имеют преимущество по сравнению с хлором, так как они более активны в щелочной или аммиачной средах.

Наряду с этими окислителями применяются и другие окисляющие реагенты, такие как озон и перекись водорода, в сочетании (или без него) с солями серебра. В связи с коротким сроком их действия по сравнению с бромсодержащими или хлорсодержащими реагентами такие окислители обычно вводят в циркулирующую воду в постоянном режиме. Использование окислителей в качестве биоцидов в контуре охлаждения, содержащем детали из меди или медных сплавов, обычно вызывает необходимость формирования на них усиленного защитного покрытия.

6.1.2.5. Использование биоцидов

Для борьбы с развитием микроорганизмов в системе охлаждения необходимо прежде всего:

- определить прямые и косвенные причины присутствия микроорганизмов (загрязнение, питательная среда, конструкция контура, эксплуатация) и возможные профилактические меры;
 - постоянно контролировать развитие микроорганизмов в системе охлаждения с помощью регулярных надежных анализов
- Проведение профилактической обработки циркулирующей воды с использованием вышеуказанных средств часто позволяет сократить применение биоцидов (действие которых направлено против развития водорослей и живых микроорганизмов), а также сохранить биоциды для использования в ударных дозах во время периодов, наиболее благоприятствующих развитию такой микрофлоры (весной, осенью), и при случайных загрязнениях

■ Действие биоцидов

Химические соединения, используемые для ограничения биологической активности в воде систем охлаждения, действуют согласно двум принципам

- **воздействие на мембрану клеточной стенки**, которое оказывают следующие вещества
 - аммоний (катион NH_4^+), обладающий поверхностно-активными свойствами;
 - некоторые производные аминов,
 - некоторые альдегидные соединения.
- **воздействие на метаболизм клетки** (энзиматические ингибиторы), которое оказывают следующие соединения
 - органические соединения серы,
 - некоторые производные аминов

■ Практическое применение

При выборе применяемых биоцидов необходимо учитывать

- их эффективность по отношению к присутствующим штаммам,
- значение pH воды, так как этот фактор часто имеет большое значение для достижения и поддержания максимальной эффективности действия биоцидов,
- совместимость биоцидов с добавляемыми в ходе обработки реагентами, а также с присутствующими материалами,
- время пребывания воды в системе охлаждения,
- явление привыкания (особенно если ввод биоцидов производится часто);
- окончательное назначение сливов (возможно, понадобится их дезактивация);

Добавление биоцидов и фильтрование на обводной линии позволяют оптимизировать два процесса:

- предохранение фильтрующих масс за счет частых промывок песка,
- предварительную чистку контуров охлаждения перед их запуском

При введении биоцидов в ударных дозах рекомендуется сокращать частоту промывок, чтобы увеличить время контакта с повышенной дозой реагента, тем самым снижая потребление биоцида и количество сбросов в окружающую среду

Следует отметить, что обработка воды систем охлаждения усложняется ввиду необходимости

- **предотвращения рисков, связанных с группой бактерий *Legionella*** (группа из 25 бактерий, вызывающая «болезнь легионеров» — болезнь, которая появляется при вдыхании выделяющихся в градирнях аэрозолей), для проведения таких профилактических работ следует использовать специальные бактерицидные препараты;
- **предотвращения рисков, связанных с амебями**, которые могут культивироваться в системах охлаждения, а затем сбрасываться в окружающую среду

вместе со сливами. Для решения этой проблемы проводят бактерицидную или даже дополнительную обработку таких сливов (с использованием O_3 , УФ)

6.2. Защита от образования отложений и коррозии

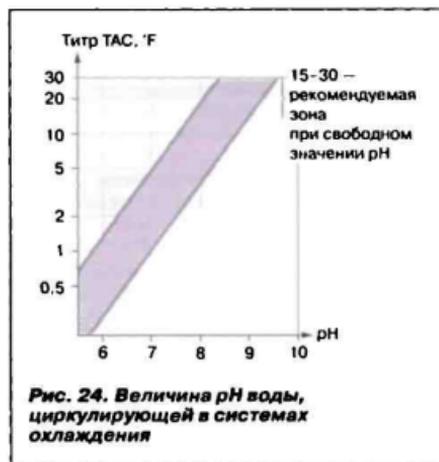
Способ проведения комбинированной защиты от образования отложений и коррозии зависит от температуры воды и химических процессов, проходящих в воде системы охлаждения, а также от материалов оборудования, которое непосредственно контактирует с водой (теплообменники, насосы, трубопроводы и т.д.). Применяются три основных способа комбинированной защиты

6.2.1. Способ, называемый естественным равновесием

Способ заключается в регулировании величины pH и титра ТАС циркулирующей воды таким образом, чтобы в воде наблюдалось кальций-углеродное равновесие, характеризующееся величиной индекса Ланжелье, близкой к нулю (см гл 3, п. 13.3). Такое регулирование проводится с помощью введения кислотных или щелочных реагентов, а также путем ограничения степени концентрирования.

Данный способ привлекает своей простотой, однако имеет серьезные ограничения, а именно

- каждому конкретному значению температуры соответствует свое определенное кальций-углеродное равновесие воды, а в системах охлаждения температура воды постоянно изменяется;
- концентрацию солей, растворенных в циркулирующей воде, следует ограничивать, что вызывает необходимость частых сливов из систем охлаждения и, следовательно, увеличивает потребление подпиточной воды;
- вода находится в состоянии нестабильного равновесия. даже охлаждение воды в градирне может вызвать значительное снижение величины pH (за счет избыточной абсорбции CO_2 и др.)



На рис. 24 приведены средние значения pH, которые устанавливаются в зависимости от титра ТАС циркулирующей воды в оборотной полуоткрытой системе охлаждения с градирней.

Способ «естественного равновесия» еще применяется на теплоэлектростанциях, работающих с практически открытой системой охлаждения (при очень низкой степени концентрирования) и с небольшими перепадами температур, в которых предусмотрена чистка с помощью циркулирующих шариков.

Тем не менее нельзя забывать, что даже в состоянии равновесия вода оказывает коррозионное воздействие на сталь, в связи с чем этот способ можно применять только для систем, конструкция которых выполнена из устойчивых материалов (ста-

ли с защитным покрытием, латуни, медно-никелевых сплавов, специальных бетонных смесей и т. д.)

6.2.2. Способы с применением ингибиторов отложений

6.2.2.1. Принцип работы

Способы с применением ингибиторов представляют собой усовершенствованный вариант предыдущего способа и предназначены для воды, склонной к образованию отложений. Технология заключается во введении в воду системы охлаждения химических реагентов, которые препятствуют осаждению карбоната кальция, особенно на горячих теплообменных поверхностях. Для этого необходимо установить величины pH, TH и TAC таким образом, чтобы обрабатываемая вода находилась в состоянии кальций-углеродного равновесия, даже с небольшим сдвигом равновесия в направлении выпадения осадка при низких температурах.

В качестве ингибиторов чаще всего применяются смеси полифосфатов, фосфонаты и особенно органические полимеры, которые обладают хорошей диспергирующей способностью.

Ингибиторы образования накипи и осадка расширяют «зону равновесия» и, следовательно, увеличивают диапазон температур, при которых вода находится в состоянии равновесия, а это позволяет работать при более низких значениях индекса Ризнера, который может даже снижаться до 3 (см гл. 3, п. 13.3.5).

6.2.2.2. Преимущества и недостатки способов, использующих ингибиторы образования отложений

При свободном значении pH в реальности применение ингибиторов возможно при титре TAC циркулирующей воды в диапазоне от 15 до 30 °F, поскольку при значениях pH в интервале от 8,5 до 9,3 возрастает риск коррозии при титре TAC, равном 10 °F, и риск появления отложений при титре TAC, близком к 30 °F. **Таким образом, степень концентрирования циркулирующей воды оказывается ограниченной.**

Введение серной или соляной кислоты может снизить значение титра TAC, но в этом случае величина pH уже не является свободной, а содержание солей сильных кислот возрастает.

Уровень pH воды и образование защитной пленки карбоната кальция ограничивают риск коррозии, но влияние солей сильных кислот остается решающим: хлориды и сульфаты ускоряют разрушение (депассивацию) защитных пленок (см также гл. 7).

В целом можно сказать, что в режиме управления образованием накипи ожидаемая скорость коррозии стали может составлять

- меньше 100 мкм в год при содержании солей сильных кислот < 50 °F,
- меньше 150 мкм в год при содержании солей сильных кислот < 75 °F

6.2.2.3. Применение дополнительных ингибиторов

Для снижения скорости коррозии в смесь ингибиторов, препятствующих отложению накипи и образованию осадка, можно добавлять дополнительные составляющие, а именно

- **цинк** является ингибитором катодной коррозии. При обычных дозах противосадочных ингибиторов, а также при значении pH выше 8,5 содержание цинка в системе охлаждения составляет менее 1 мг/л, а присутствие диспергатора оказывает благотворное воздействие на содержание цинка. В таких условиях наблю-

дается положительная тенденция снижения скорости коррозии на 20–50 %, особенно при невысоком содержании солей сильных кислот. Кроме того, цинк усиливает действие некоторых бактерицидных веществ;

— **ингибиторы коррозии меди** (азотсодержащие органические соединения — см гл 7, п 6 1 б) применение таких ингибиторов рекомендуется при использовании окисляющих биоцидов или при наличии в растворе фосфонатов, так как они катализируют процессы коррозии медьсодержащих сплавов,

— **хроматы** хроматы эффективны в концентрациях примерно несколько миллиграммов на литр, но их недостатком является токсичность Cr(VI), который нужно переводить в трехвалентный хром Cr(III), а затем удалять из сточных вод перед их сбросом

6.2.3. Способы с применением ингибиторов коррозии

6.2.3.1. Принцип работы

Принцип действия способов с применением ингибиторов коррозии состоит в следующем

— ограничение рисков образования отложений при снижении величины pH воды до значений, близких к 7 (управление уровнем pH), или жесткости воды (умягчение или деминерализация),

— дополнительное введение ингибитора, препятствующего коррозии за счет образования защитной пленки, которая должна быть однородной, плотно прилегающей к поверхности, непористой и не препятствовать процессу теплообмена,

— применение комбинированных ингибиторов, препятствующих коррозии и образованию накипи, с возможной кислотной обработкой для воды с низким уровнем кальциевой жесткости (титра ТСa) или с невысоким значением титра ТАС

Большинство ингибиторов коррозии, применяемых в полукрытых системах охлаждения, представляют собой композитные соединения с анодной и катодной защитой (табл. 6), а вводимые дозы таких ингибиторов составляют несколько десятков миллиграммов на литр

Таблица 6

Сравнительная таблица характеристик четырех основных групп ингибиторов коррозии для полукрытой системы охлаждения (с градирней)

Параметр	Хромат цинка + диспергатор	Полифосфат цинка + диспергатор	Фосфонат цинка + диспергатор	Фосфаты + диспергаторы + органические ингибиторы
Диапазон pH	6,4–6,8	6–7,5	7–8,5	7–9
Время пребывания в системе, ч	> 100	< 40	< 150	> 100
Эффективность	Отличная	Очень хорошая	Хорошая	Отличная
Скорость коррозии, мкм в год	< 30	< 60	< 100	< 50

6.2.3.2. Достижение оптимального уровня pH

Чтобы значение pH воды в системе охлаждения находилось в требуемых пределах, величина титра ТАС подпиточной воды должнв быть снижена. Существуют три способа решения этой задачи

- **добавление кислоты** (но это вызывает увеличение солесодержания),
- **декарбонатация на карбоксильной смоле** (это позволяет одновременно снизить титры ТАС и ТН подпиточной воды, а следовательно, и ее солесодержание);
- **декарбонатация известкованием** (этот способ целесообразен в том случае, если нужно провести осветление)

6.2.3.3. Поиск оптимальной степени концентрирования

Для экономии воды и кондиционирующих добавок целесообразно добиваться оптимальной степени концентрирования воды в системе. Часто стремятся иметь степени концентрирования от 3 до 6, хотя можно достигнуть значений, превышающих 10 (см. ниже описание обработки в обводной линии), с отсутствием сброса (но это не отменяет необходимость сливов из системы). Степень концентрирования зависит:

- от условий эксплуатации системы (турбулентные зоны, случайные утечки и т. д.);
- от рисков осаждения солей,
- от рекомендуемого времени пребывания выбранного ингибитора в системе.

Если для поддержания нужного уровня pH применяется серниая кислота, то высокое содержание ионов SO_4^{2-} вызывает необходимость ограничения степени концентрирования, чтобы не превысить предел растворимости сульфата кальция, а также не вызвать разрушение бетонных поверхностей за счет образования солей Канглота (Candlot) (см. гл. 7, п. 8.2.4)

При значениях pH < 8 необходимо ограничивать содержание кремнезема до 150 мг/л. При свободном уровне pH это содержание должно быть снижено, особенно в присутствии ионов аммония

■ Обработка воды в обводной линии

Содержанием ионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , SiO_2 и, возможно, SO_4^{2-} управляют двумя способами.

- либо проводят специальную обработку подпиточной воды — декарбонатацию, обескремнивание, обратный осмос или нанофильтрацию;
- либо предусматривают обработку в обводной линии в соответствии со схемой, показанной на рис. 25

Преимущество такого технологического решения заключается в возможности обрабатывать меньшие объемы воды по сравнению с объемом подпиточной воды, используя массовое осаждение карбонатов и кремнийсодержащих соединений, наличие которых является неизбежным следствием высоких значений титров ТН, ТАС и содержания SiO_2 , поддерживаемых в главном контуре циркуляции воды.

Принцип обработки в обводной линии был разработан специально для засушливых регионов, в частности в США, в целях увеличения степени концентрирования до 10–15 вплоть до исключения сбросов. Для того чтобы достигнуть этого, необходимо предусмотреть систему удаления всех солей, включая NaCl. Такая система должна иметь обработку выпариванием-кристаллизацией (см. гл. 16, п. 5), а в случае необходимости и прекарбонирование обратным осмосом (для регионов с достаточно сухим и теплым климатом можно предусмотреть обратный осмос



с последующим выпариванием рассола в специальных прудах) Такая система также должна предусматривать добавление в раствор ингибитора коррозии

6.2.4. Сбросы

Часто сточные воды невозможно полностью ликвидировать из-за значительных капитальных затрат и эксплуатационных расходов. В этом случае необходимо решать проблему их сбросов в соответствии с действующим местным законодательством



Фото 11. Нефтеперерабатывающий завод в г. Тоско (США). Обработка воды в обводной линии контура охлаждения: декарбонатация и обескремнивание. Производительность 37 м³/ч

Обычно запрещается сброс сточных вод с концентрацией хрома Cr(VI) выше $0,1 \text{ г/м}^3$. Существуют разнообразные промышленные технологии обработки, позволяющие удалить соединения хрома (см гл 3, п 12.6.2)

Концентрации фосфатов PO_4 ($< 20 \text{ мг/л}$) и цинка Zn ($< 5 \text{ мг/л}$), содержащихся в воде систем охлаждения, обычно не превышают нормативных требований по сбросам загрязнители, но нормы постоянно меняются

6.3. Проектирование системы охлаждения

Для успешного проектирования системы охлаждения недостаточно иметь информацию о химическом составе воды, и оптимальное решение может быть получено только с участием специалиста по кондиционированию и обработке воды, а также предприятия, которое будет эксплуатировать эту систему

6.3.1. Исходные данные

Исходными данными являются

- результаты анализов используемых вод,
- концепция системы охлаждения характеристики аппаратов (скорость течения, материалы, градиенты температур, температуры поверхностей и т. д.),
- требуемая эффективность (коэффициент теплопередачи, скорость коррозии),
- ограничения по эксплуатации,
- возможные операции с применением кислот (H_2SO_4 или HCl),
- ограничения, относящиеся к сбросам в окружающую среду,
- согласованная стоимость эксплуатации

6.3.2. Эксплуатационный баланс

Для принятия правильного решения часто приходится выбирать между возможными вариантами, составляя несколько эксплуатационных балансов или рассчитывая чистую приведенную стоимость и сравнивая различные способы защиты систем охлаждения. Такой баланс должен учитывать все составляющие эксплуатационных расходов, а именно

- потребление реагентов,
- стоимость воды, что часто составляет основную статью расходов (превышает в несколько раз стоимость реагентов, особенно если речь идет о питьевой воде),
- оплату труда персонала, ответственного за контроль и техническое обслуживание оборудования,
- стоимость амортизации оборудования,
- расходы на техническое обслуживание системы охлаждения, а также оценку его влияния на производительность системы

Составление балансов позволяет лучше оценить влияние увеличения степени концентрирования, которая при сокращении эксплуатационных расходов влечет за собой возможность быстрой амортизации очистного оборудования (декарбонатация, фильтрование и т. д.)

6.4. Разработки в целях экономии воды

Повторное использование промышленных или городских сточных вод в качестве подпиточной воды системы охлаждения позволяет ограничить забор при-

родной воды, снизить затраты на подпитку системы и вредные сбросы в окружающую среду

Чтобы не превратить системы охлаждения в очистные сооружения, а фильтры на обводной линии в орошаемые биофильтры, необходимо строго контролировать характеристики подпиточной воды, а именно содержание ВВ и их способность засорять систему, ХПК, БПК₅, отношение ХПК/БПК₅, содержание общего и аммиачного азота, содержание масел, углеводов, жиров, минерального и органического фосфора и т. д.

Наличие ионов аммония в подпиточной воде приводит к необходимости биологической нитрификации воды системы с образованием азотной кислоты. Если щелочность воды недостаточна, то величина pH может снизиться до 6 и, следовательно, биологическая нитрификация будет замедляться, вызывая постепенное увеличение значений pH, но такая нестабильность обычно является неприемлемой.

6.4.1. Рециркуляция конденсатов испарений в аграрно-пищевой промышленности

Конденсаты испарений (образующиеся при производстве сахара, молока, дрожжей, глюкозы и т. д.) имеют невысокий уровень минерализации, но обладают явно выраженным коррозионным характером. Проведение небольшой повторной минерализации (путем разбавления исходной водой или с помощью фильтрации через минеральную загрузку — см гл 3, п 13) позволяет исправить этот недостаток. Конденсаты испарений высокого качества предназначаются для эффективного использования, например, в качестве воды для подпитки котельных установок. Конденсаты испарений, загрязненные ОВ, используются в системах охлаждения, где они могут вызывать развитие интенсивных биологических процессов, с которыми нужно бороться с помощью хлорирования, озонирования или бактерицидной обработки.

6.4.2. Пример рециркуляции сточных вод в нефтепереработке

Используя для подпитки систем охлаждения очищенные маслосодержащие воды (см. рис. 26), нефтеперерабатывающий завод «Total Fina Elf» в г. Гранжюи (Франция) достигает экономии скважинной воды до 500 000 м³ в год.

Основные загрязнения, вносимые подпиточной водой:

- аммиачные и серосодержащие соединения (содержание группы NH₄ = 20 мг/л);
- соли, особенно хлориды (от 150 до 300 мг/л),
- органические соединения (БПК₅ < 20 мг/л, ХПК = 80 мг/л, углеводороды < 1 мг/л);
- ВВ < 10 мг/л.

Испытания, проведенные в лабораторных, а затем и в промышленных условиях, позволили разработать такую технологическую линию кондиционирования воды, которая позволяет снизить скорость коррозии стали до 25 мкм, не ухудшая теплообмен, при этом степень концентрирования поддерживается на уровне 2,5 путем **добавления только сточной воды**. Уровень pH устанавливается примерно 7,5, а концентрация хлоридов не превышает 650 мг/л. По величине электропроводности воды определяется необходимость слива воды из системы. Обычно такая необходимость возникает, когда содержание хлоридов превышает предельно допустимый уровень; после слива запускается система подпитки водой из скважин.

Хлорирование в непрерывном режиме, совмещенное с добавлением биологического диспергатора, дополняет антикоррозионное кондиционирование, предназначенное для защиты поверхностей из различных металлов.

Такие результаты могут быть достигнуты только при строгом соблюдении правил эксплуатации, а также при условии тесного сотрудничества эксплуатирующего предприятия системы со специалистами по обработке и кондиционированию воды (см. также гл. 25, п. 4.3.3, описание системы водоснабжения на заводе «Ретек»).



6.5. Открытые проточные системы

Открытые проточные системы характеризуются большой производительностью и коротким временем пребывания воды в системе. Полная обработка воды в этих условиях является очень дорогостоящей. Продуманный выбор материалов конструкции позволяет сократить риски возникновения коррозии, а кондиционирование сводится к использованию диспергаторов, препятствующих возникновению отложений, а также к введению бактерицидных реагентов в ударных дозах (которые обычно содержат окислители).

Чистоту в трубчатых проточных теплообменниках поддерживают с помощью устройств чистки, которая выполняется без остановки работы теплообменников и обеспечивается прохождением внутри трубопроводов шариков из пеноматериала («Targogge», «Technics» и т. д.).

В настоящее время подобные открытые системы применяются редко по причинам:

- ограничений по забору исходной воды;
- борьбы против «термических загрязнений» в сбросах в окружающую среду;
- очень высокой эффективности полукрытых систем охлаждения, в которых сведена к минимуму вероятность случайных загрязнений окружающей среды в результате утечек рабочих жидкостей.

6.6. Системы охлаждения, снабжаемые морской водой

Системы охлаждения, снабжаемые морской водой (при наличии соответствующего источника), применяются для охлаждения конденсаторов электростанций и/или батарей трубчатых теплообменников

Устройства водозабора содержат решетку и механические сита с размером отверстий 4 мм. Такое процеживание выполняет функцию необходимой механической защиты, а также снижает опасность коррозии, препятствуя образованию крупных отложений. К выбору материалов конструкции необходимо подходить осторожно (см. гл. 7, п. 5.7), а также по возможности применять катодную защиту от коррозии.

6.6.1. Открытые системы

Обычно открытые системы применяются для конденсаторов электростанций, находящихся на берегу моря или на борту судов.

Титановые теплообменники не нуждаются в защите от коррозии (они устанавливаются в последнее время на атомных станциях). Теплообменники из сплавов меди, а особенно из латуни типа «Amigaute», необходимо покрывать защитной пленкой на основе гидроксида железа. Сформировать такую пленку можно путем введения ионов Fe^{2+} в виде семиводного гидрата сульфата железа с концентрацией 1 мг/л, добавление которого необходимо проводить в течение примерно 300 дней в году по 1 ч в день.

Защита от биологических обрастаний должна учитывать необходимость борьбы с моллюсками, которые, проходя даже сквозь тонкие решетки в виде личинок, имеют тенденцию к образованию колоний внутри трубопроводов и вентиляций и таким образом провоцируют засоры, а также коррозию за счет дифференцированной аэрации и т. п. Наличие в системе моллюсков требует бактерицидной обработки, которая чаще всего проводится с помощью введения гипохлорита, получаемого электролизом непосредственно на месте из морской воды (требуемая остаточная доза Cl_2 на выходе из конденсаторов составляет 0,2 мг/л).

При температуре воды от 30 °С хлорирование проводится в непрерывном режиме. При более низких температурах хлорирование осуществляется периодически, например в течение 15 мин каждые 6 ч. При температурах ниже 12 °С хлорирование можно не проводить.

Кроме того, все чаще стали применять механическую чистку труб конденсаторов, которая проводится с помощью шариков из пеноматериала.

6.6.2. Полуоткрытые системы

Несмотря на то что такие системы применяются редко, иногда целесообразно использовать именно их, при этом степень концентрирования не превышает обычно значений 1,2–1,3. Кроме мер предосторожности, которые были описаны для открытых систем, для полуоткрытых систем необходимо проводить кислотную вакцинацию подпиточной воды, что резко снижает титр ТАС. Также рекомендуется использовать ингибитор и/или диспергатор.

6.7. Закрытые системы

Данные системы называют закрытыми из-за практически нулевого потребления подпиточной воды, однако они могут контактировать с воздухом (например, системы с охлажденной водой) или, наоборот, быть герметичными и находиться под давлением инертного газа (например, первичные системы в черной металлургии).

Заполнение и подпитка закрытых систем проводятся за счет очищенной, деминерализованной и умягченной воды (необходимо следить за тем, чтобы в состав воды не входило большое количество сильных электролитов, в частности сульфатов и хлоридов)

Для борьбы с коррозией необходимо использовать анодные ингибиторы в дозах выше 1 г/л во избежание риска локальной коррозии. Основными ингибиторами являются хроматы, нитриты, фосфаты, силикаты, молибдаты, соединения, содержащие азот, бор, органические препараты и т. д. Ингибиторы выбирают с учетом материалов конструкции, возможного насыщения воды в сети кислородом, а также в зависимости от природы охлаждаемых сред (риски утечек). Бактерицидные реагенты (неокисляющие) могут использоваться для борьбы с различными технологическими загрязнениями, а также для ограничения разложения некоторых применяемых в обработке воды веществ.

6.8. Подготовка систем охлаждения

Подготовительный этап имеет ключевое значение, так как при первом же контакте стальных поверхностей конструкции с водой могут начаться необратимые процессы коррозии

Таким образом, необходимо проводить подготовку системы еще до заполнения ее водой, предусматривая следующие операции

- чистка с помощью диспергирующих препаратов и моющих средств,
 - формирование защитного слоя путем введения повышенных доз ингибиторов
- В дальнейшем защитный слой поддерживают с помощью введения ингибиторов дозирующим устройством, которое работает по показателям расхода подпиточной воды

6.9. Контроль систем охлаждения

Для того чтобы обеспечить высокую эффективность кондиционирования, необходимо осуществлять все виды строгого контроля. Контролируют главным образом следующее

- потребление воды и реагентов,
- работу блоков очистки и введения реагентов,
- регулярность отбора проб воды и проведения анализов (особенно воды заполнения и подпитки системы: величины pH и титра ТАС, содержание Ca, Cl, ингибиторов);
- размеры коррозии: коррозионную активность, выполнение контрольных тестов, взятие контрольных образцов (см. также гл. 7, п. 7);
- бактериологический состав с помощью бактериологических тестов и/или бактерий группы *Legionella* и др.;
- эффективность теплообмена с измерением (если это возможно) коэффициента теплопередачи одного теплообменника системы, выбранного в качестве контрольного



Глава

25

-
1. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОЧИСТНЫХ СООРУЖЕНИИ И УСТАНОВОК (ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ) 1617
 2. АГРАРНО-ПИЩЕВАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ..... 1623
 3. ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ..... 1631
 4. НЕФТЯНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ 1639
 5. ТЕПЛОЭЛЕКТРОСТАНЦИИ..... 1649
 6. ХИМИЧЕСКАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ 1657
 7. ТЕКСТИЛЬНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ 1664
 8. ЧЕРНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ 1667
 9. ЦВЕТНАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ И ГИДРОМЕТАЛЛУРГИЯ 1674
 10. ОБРАБОТКА ПОВЕРХНОСТЕЙ (ОБЕЗЖИРИВАНИЕ И НАНЕСЕНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ) 1681
 11. АВТОМОБИЛЬНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ И МЕТАЛЛООБРАБОТКА..... 1686
 12. ГОРНОДОБЫВАЮЩАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ..... 1690

Производственные процессы и обработка сточных вод

В настоящей главе дается краткий обзор технологических линий, позволяющих обрабатывать сточные воды предприятий различных отраслей промышленности в полном соответствии с экологическими законодательными и нормативными требованиями, а в некоторых случаях обеспечивать частичную или полную рециркуляцию воды в производство.

1. Проектирование очистных сооружений и установок (общие положения)

Ниже определяются общие положения по проектированию установок и сооружений очистки промышленных сточных вод (ПСВ) с учетом известного принципа «длительного устойчивого развития» (см также гл 2, п 3 1) и рассматриваются основные способы обработки для их практического использования (см также гл 3 и 4)

1.1. Организация потоков

Стоимость обработки ПСВ в соответствии с возможными технологическими решениями в значительной степени определяется системой водоотведения как в производственных цехах, так и на промышленном предприятии в целом



Организация выходящих водных потоков должна как можно точнее соответствовать «идеальной» схеме, приведенной на рис. 1, которая в общем случае обеспечивает наилучшую технико-экономическую оптимизацию системы водоотведения промышленного предприятия.

В систему водоотведения входят

- внутренние системы рециркуляции в производственных цехах, позволяющие
 - по мере возможности осуществлять извлечение (в целях повторного использования) сырьевых материалов,
 - уменьшать расход загрязненных потоков, подлежащих обработке;
 - снижать погрешение свежей воды,
- системы разделения потоков сточных вод, потоки сточных вод бывают
 - **периодические**
 - загрязненные или незагрязненные ливневые воды,
 - воды от опорожнений, промывок и т. п.;
 - загрязненные или незагрязненные охлаждающие воды;
 - **постоянные.**
 - производственные сточные воды, требующие специфической предварительной обработки,
 - производственные сточные воды, не требующие специфической предварительной обработки

Такое разделение потоков позволяет применять накопительные, буферные и аварийные резервуары

— бассейн-накопитель ливневых вод, предназначенный для сбора и хранения загрязненных ливневых потоков и последующей их дозированной подачи на очистные сооружения,

— буферный усреднительный резервуар, который устанавливается в производственных цехах, сточные воды которых требуют специфической предварительной обработки,

— усреднительный резервуар с переменным уровнем заполнения общим потоком сточных вод предприятия, который устанавливается перед очистными сооружениями и позволяет регулировать режим обработки и массовый поток загрязнений, поступающих на очистные сооружения,

— аварийный резервуар (обычно пустой), в который поступают сточные воды в случае непредусмотренного сброса; сточные воды из этого резервуара при контролируемом расходе направляют на очистные сооружения после анализов, подтверждающих, что их поступление не окажет пагубного воздействия на последующие технологические процессы очистки

1.2. Внутренние системы рециркуляции

Внутренние системы рециркуляции имеют свою специфику в каждой отрасли промышленности и обычно предназначаются для конкретных производственных цехов, а соответствующее технологическое оборудование позволяет извлекать сырьевые материалы (материалы, формирующие специальные покрытия, масла и жиры, волокна) и/или воду для их повторного использования в производстве и даже рекуперировать тепловую энергию

1.3. Специальная предварительная обработка

Разделение потоков сточных вод по производственным цехам или группам цехов позволяет проводить их специальную обработку, например

- сточные воды с «жесткой» ХПК (не разлагаемой биологическим путем) — подвергать окислению (O_3 , способ *Toccata*, жидкофазное окисление) или адсорбционной обработке (активированный уголь, ионообменные смолы), см гл 3, пп 10, 12, 13,
- сточные воды с токсичными загрязнениями (специфическими соединениями, тяжелыми металлами и т. п.) — подвергать обработке химическим осаждением и с помощью процессов окисления-восстановления, см гл 3, пп 2 и 12,
- сточные воды, содержащие аммоний (коксохимическое производство и др.) — подвергать отдувке, см гл 16, п 13 2,
- концентрированные биоокисляемые сточные воды — подвергать биологической обработке с использованием технологий с высокой нагрузкой: метанизация, способ *Ultrafor* (см гл 11 и 12), такая обработка является наиболее экономически выгодной,
- загрязненные охлаждающие воды — подвергать обработке обычно в целях возврата в систему охлаждения,
- различные сточные воды сложного состава, например содержащие серу (кожевенных предприятий, отработанные содовые щелоки и т. п.) — подвергать специальной обработке

1.4. Первичная обработка

На стадии первичной обработки сточных вод могут применяться следующие процессы:

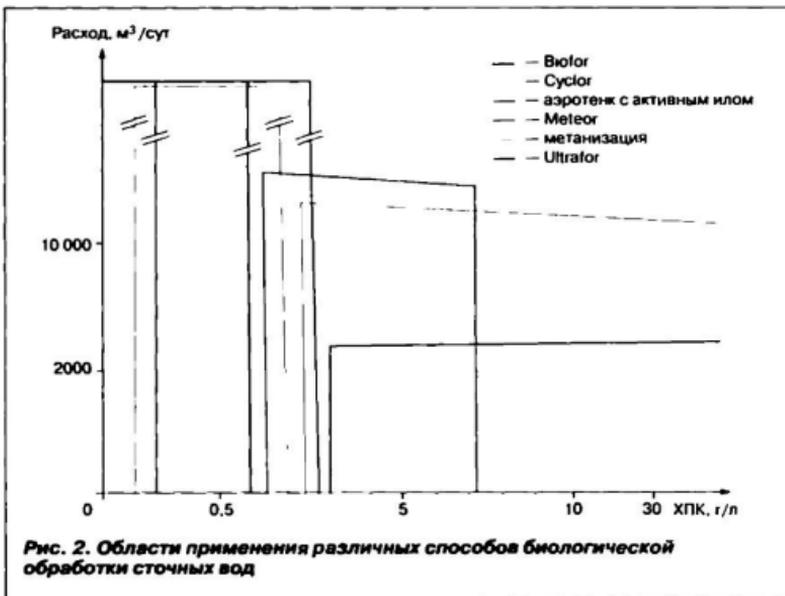
- процеживание на решетках и/или ситах, характерное для большинства отраслей промышленности,
- извлечение твердых частиц и/или жиров из ливневых вод, из сточных вод предприятий черной и цветной металлургии и некоторых производств агро-пищевой промышленности (см гл 9),
- удаление масел (нефтяная и нефтехимическая промышленность, теплоэлектростанции, черная и цветная металлургия),
- нейтрализация,
- охлаждение (по мере необходимости, например, для последующих этапов обработки),
- коагуляция-флокуляция с последующим разделением фаз на основе традиционных методов, описанных в гл 10, цель которых состоит
 - в удалении взвешенных и коллоидных частиц,
 - в осаждении и отделении металлов и токсичных солей,
 - в удалении эмульгированных масел

1.5. Биологическая обработка

При выборе технологии биологической обработки следует исходить

- из способности сточных вод к биоразложению (отношение ХПК/БПК, причем особое внимание следует уделять случаям, когда это отношение превышает 3),
- из концентрации загрязнений по таким показателям, как ХПК, БПК, азот по Кьельдалю (НК), содержание фосфора,
- из общего солесодержания, резкие изменения которого могут оказывать влияние на биологические процессы

Возможно использование любых биотехнологий (см гл 11 и 12), но оптимальные области применения той или иной из них иллюстрируются диаграммой на рис. 2



1.6. Третичная очистка

Цели третичной очистки сточных вод, дополняющей рассмотренные выше стадии обработки, могут быть различными. С одной стороны, необходимо повышать качество очищенной сточной воды в целях соблюдения норм по сбросам в окружающую среду путем:

- уменьшения содержания взвешенных веществ (ВВ) и снижения концентрации коллоидной части ХПК;
- удаления фосфора (осаждением солями железа или алюминия, реже — с помощью извести);
- снижения содержания бионеразлагаемой части ХПК;

- снижения цветности, в частности, сточных вод текстильной промышленности,
- удаления специфических соединений, таких как пестициды, фунгициды, металлы, металлоиды, окисляющиеся хлором или его аналогами вещества, поверхностно-активные вещества (ПАВ), растворимые углеводороды, азот- и серосодержащие вещества, различные анионы и т. д.

Заметим, что в трех последних случаях ставятся те же задачи, что и в специальной предварительной обработке. В связи с этим в каждом конкретном случае необходимо определить экономическую целесообразность одного из двух следующих вариантов удаления упомянутых загрязнений.

- в процессе обработки малых расходов сточных вод, что легче ввиду более высокой концентрации загрязнений
- на стадии третичной очистки, т. е. из общего потока сточных вод промышленного предприятия, прошедших биологическую обработку, которая обычно обеспечивает удаление определенной части этих загрязнений

Разумеется, такая проблема возникает лишь в тех случаях, когда рассматриваемые загрязнения не оказывают токсического действия на процесс биологической обработки.

С другой стороны, третичная очистка может осуществляться и для последующей рециркуляции (частичной или полной) обработанной воды в производственные

Таблица 1
Способы и технологии, применяемые на стадии третичной очистки сточных вод

Удаляемые вещества и улучшаемые параметры	Используемые способы и технологии						
	Технологии окисления		Мембранные технологии ¹		Активированный уголь	Ионообменные смолы или специальные сорбенты	Осаждение коагуляция флокуляция разделение ²
	Тоссава O ₃ H ₂ O ₂ УФ ³	O ₂ + биологическая очистка	Ультрафильтрация	Нанофильтрация обратный осмос			
ВВ и коллоидная часть ХПК			х				х
Соединения фосфора				х			х
Биологически неразлагаемая часть ХПК	х	х		х	х		х
Вещества, окисляемые хлором и его аналогами	х	х		х	х		
Обесцвечивание	х	х		х	х		х
Специфические загрязнения	х			х	х	х	
Анионы, катионы				х		х	х
Металлы				х			х

¹ Применению мембранных технологий или ионообменных смол имеет преимущество, состоящее в получении очищенной воды превосходного качества, однако требует проведения соответствующей предварительной обработки и, что особенно важно, предлагает наличие возможности сброса соляного концентрата в природную среду или его переработки.

² Традиционные методы разделения фаз описаны в гл. 10.

³ УФ³ — ультрафиолетовое излучение; описание технологии окисления приведено в гл. 17.

цеи или (что случается чаще) в системы охлаждения с градирнями, системы промывки, системы пожаротушения и даже в системы питания котельных установок. В последнем случае может потребоваться дополнительная очистка воды для доведения ее до требуемого качества. Наконец, в некоторых ситуациях применение технологии выпаривания и кристаллизации (см гл. 16, п. 5) позволяет исключить любые сбросы сточных вод в окружающую среду.

В табл. 1 приводится краткий перечень различных способов и технологий, применяемых на стадии третичной очистки.

1.7. Обработка осадков

Как правило, проект комплекса технологических линий обработки сточных вод и осадков должен являться результатом оптимизации, которая часто приводит к необходимости добиваться снижения объема образующихся осадков, поскольку, как известно, стоимость обработки и вывоза этих отходов часто составляет основную часть эксплуатационных затрат на очистных сооружениях.

Существуют различные способы снижения объема образующихся осадков:

- снижение внутрицеховых и внутризаводских потерь (см п. 1.2);
- уменьшение использования минеральных реагентов, приводящих к образованию осадков, поскольку точно таких же результатов обработки можно добиться применением полимеров, а также с помощью биологических или окислительных методов обработки,
- по возможности (при наличии современных технологий) использование биологических технологий, приводящих к образованию меньших объемов осадка: метанизация или мембранные биореакторы (**Ultrafor**),
- снижение массы излишнего биологического ила путем анаэробного сбраживания (см. гл. 18) или более радикальным способом **Biolysis** (см гл. 11), который обеспечивает снижение его массы на 50 и даже на 85 %. Этот способ позволяет получать более минерализованный осадок, который легче обезвоживается и может храниться длительное время.

При обработке ПСВ различных отраслей промышленности формируются осадки, различающиеся по своим характеристикам

- первичные и третичные осадки, специфичные для каждой отрасли промышленности. Их конечное назначение может различаться, вследствие чего может потребоваться упоминавшееся выше (см п. 1.1) разделение потоков и оптимизация обработки исходя из различных факторов, например в зависимости от типа захоронения, на которое можно вывозить обработанные осадки, возможности их размещения на сельскохозяйственных угодьях, объемов капитальных вложений и эксплуатационных затрат и т. п.,
- биологические илы: принципы обработки те же, что и в случае обработки биологических илов, образующихся при обработке городских сточных вод (ГСВ). В некоторых случаях (за исключением применения таких технологий, как **Biolysis** или анаэробное сбраживание) илы могут характеризоваться повышенным содержанием летучих соединений в общей массе сухих веществ (СВ), вследствие чего их обезвоживание часто сопряжено с некоторыми трудностями.

1.8. Запахи

Содержание дурнопахнущих веществ в ПСВ зависит от технологического процесса, реализуемого в конкретном цехе или на всем предприятии в целом. Основная масса этих веществ удаляется на стадии предварительной обработки, в которую

при необходимости включают процессы аэрации или отдувки. Технология обработки требует в каждом случае отдельного рассмотрения.

Такие же газы формируются и непосредственно в процессе обработки (особенно при биологической очистке сточных вод и обработке осадков). По своему составу они аналогичны газам, которые образуются на станциях очистки ГСВ, и в силу этого для их удаления могут быть использованы те же самые традиционные технологии (см. гл. 16, п. 2).

2. Аграрно-пищевая промышленность

2.1. Общие положения

Как было показано ранее (см. гл. 2, п. 3), аграрно-пищевая промышленность является крупным потребителем воды [например, при производстве 1 л жидкой продукции (пиво, молоко, газированные напитки, вино и т. п.) образуется от 1 до 5 л сточных вод], причем вода используется на самые различные нужды.

- для промывки и транспортировки продуктов,
- для производства пара,
- в качестве сырьевого продукта (например, при производстве напитков),
- для промывки реакторов, оборудования, трубопроводов и т. п.,
- для охлаждения.

Различие видов использования воды обуславливает разнообразие характеристик формирующихся сточных вод, которые, тем не менее, имеют между собой определенное сходство, заключающееся в следующем:

- содержащиеся в них **загрязнения, преимущественно органического происхождения, легко разлагаются биологическим путем** и характеризуются отношением ХПК/БПК₅ < 2,

— они обладают склонностью к кислотообразованию и быстрой ферментации. Вследствие этого технологические линии обработки обычно основаны на биологических процессах (принципы такой обработки описаны в гл. 4, технологии — в гл. 11), которым, как правило, предшествует специальная предварительная обработка, отвечающая конкретному типу производства.

Одной из особенностей многих предприятий данного сектора промышленности является **сезонный характер** их работы, что связано.

- с необходимостью переработки сельхозпродукции немедленно после сбора урожая (сахарные и винокурные заводы, фабрики консервирования овощей и фруктов);
- сезонным спросом на продукцию у потребителя (предприятия по производству прохладительных напитков).

В результате количество подлежащих обработке загрязнений изменяется в весьма широких пределах, а длительность периода поступления наибольших объемов сточных вод относительно невелика. Это обстоятельство приводит к необходимости предусматривать уже на этапе проектирования возможность работы в двух режимах: сезонном и внесезонном. В таких случаях целесообразно применять двухступенчатую биологическую обработку (высокая нагрузка + низкая нагрузка).

Отметим также, что в связи с постоянным ужесточением норм на сбросы в окружающую среду во многих случаях после стадии биологической обработки требуется дополнительная очистка (см. п. 1.6). Поэтому соответствующие технологические линии следует проектировать таким образом, чтобы не только обеспечить выполне-

ние норм сброса очищенной воды в окружающую среду, но и особенно возможность возвращать воду (частично или полностью) в производство

2.2. Предварительная обработка

Сточные воды некоторых предприятий аграрно-пищевой промышленности нуждаются в предварительной обработке перед их биологической очисткой. В табл 2

Таблица 2
Процессы предварительной обработки сточных вод на предприятиях аграрно-пищевой промышленности

	Тонкое процеживание	Удаление песка	Удаление жиров	Отстаивание или флотация с реагентами или без реагентов
Пивоваренные и солодовенные заводы	x			В зависимости от содержания ВВ
Производство подслащенных прохладительных напитков	x			В зависимости от содержания ВВ
Виноделие	x			
Мясная промышленность	x		x	x
Кожевенные заводы, производство лайковой кожи	x		x	x
Сахарные заводы	x	x		x
Винокуренные и гидролизные заводы	x			
Предприятия молочной промышленности	x		x	x
Крахмальные заводы	x	x		x
Биотехнологические производства	x			
Предприятия консервирования овощей и фруктов	x	x		x
Кондитерская промышленность	x		x	
Предприятия по производству готовых блюд и полуфабрикатов	x	x	x	x
Маслозаводы			x	x

приведен перечень процессов предварительной обработки, используемых обычно на предприятиях этой отрасли.

Помимо предварительной обработки сточных вод необходима также установка буферного резервуара для регулирования расхода сточной воды и потока загрязнений в пределах, допустимых для стадии биологической очистки. Сточные воды в резервуаре необходимо перемешивать или аэрировать в зависимости от их склонности к ферментации.

2.3. Биологическая обработка

Выбор наиболее подходящей технологии биологической обработки зависит от различных факторов:

Таблица 3
Процессы биологической обработки сточных вод на предприятиях аграрно-пищевой промышленности

	Двухступенчатая обработка			Одноступенчатая обработка		
	Анаэробная	Аэробная с высокой нагрузкой	Обработка активным илом с низкой нагрузкой	Обработка активным илом с нитрификацией-денитрификацией	Способ Ultrafor	Способ Cyclic
Пивоваренные/ солодовенные заводы	x		x	x	x	x
Производство подслащенных напитков	x		x		x	x
Виноделие		x	x			x
Мясная промышленность				x	x	
Кожевненное производство				x		
Сахаро-рафинадные заводы	x	x	x	x		
Винокуренные и гидролизные заводы	x		x			
Предприятия молочной промышленности				x	x	x
Крахмальные заводы	x		x	x		
Биотехнологические производства	x	x	x	x	x	
Предприятия консервирования овощей и фруктов	x	x	x			
Кондитерская промышленность	x		x	x		
Предприятия по производству готовых блюд и полуфабрикатов		x	x	x	x	
Маслозаводы				x		x

- действующие нормы сбросов в окружающую среду, которые могут вызвать необходимость двухступенчатой биологической обработки;
- исходная концентрация по ХПК, при значениях ХПК > 2 г/л экономически целесообразно применение таких технологий, как метанизация, способ **Ultrafor** или аэробная технология с высокой нагрузкой;
- сезонная периодичность образования сточных вод, обуславливающая обычно необходимость двухступенчатой обработки (высокая нагрузка + низкая нагрузка);
- необходимость удаления азотсодержащих загрязнений (часто довольно значительных) или ее отсутствие;
- необходимость удаления фосфорсодержащих загрязнений (типичных для молочной и мясной промышленности), причем в подобных случаях повышенное содержание легкобиоразлагаемой БПК является аргументом в пользу применения процессов биологической дефосфатации (см гл 4, п 2 1 4);
- отсутствие свободных территорий, что может потребовать применения компактных очистных установок, анаэробные системы, установки **Ultrafor**, **Biofor**;
- конечное назначение образующихся осадков, в связи с которым могут быть применены процессы с низким выходом осадка метанизация, способ **Ultrafor** или обработка активным илом с уменьшением объема образующегося осадка (способы **Biolysis E** или **O**)

В табл. 3 приведен перечень процессов биологической обработки, наиболее часто используемых на предприятиях аграрно-пищевой промышленности

2.4. Третичная очистка

В соответствии с действующими нормами сброса в окружающую среду третичная очистка все чаще оказывается необходимой стадией обработки ПСВ предприятий аграрно-пищевой промышленности для удаления следующих основных загрязнений.

- биологически неразлагаемая часть ХПК,
- цветность,
- фосфор,
- ВВ

С этой целью можно с успехом применять любые технологии, описанные в п 1 6

2.5. Обработка осадков

Поскольку аграрно-пищевая промышленность является неотъемлемой частью агропромышленного комплекса, начиная от производства сырьевых материалов и заканчивая выпуском готовой продукции, традиционным способом утилизации осадков, образующихся при очистке ПСВ, остается их внесение в почву сельскохозяйственных угодий. Уровень содержания тяжелых металлов и опасных загрязнений в этих осадках обычно намного ниже предельных значений, определяемых соответствующими нормами.

Осадки, образующиеся преимущественно в форме биологических илов, обычно подвергают предварительному обезвоживанию традиционными методами (см гл 18 и 19)

2.6. Удаление запахов

Поскольку сточные воды предприятий аграрно-пищевой промышленности обычно склонны к брожению, необходимо принимать простейшие меры, предупреждающие появление запахов (устранение застойных зон, аэрирование буферных резервуаров, ограничение времени хранения осадков и т.п.)

В случае размещения очистных сооружений в городской черте или в зонах с жесткой санитарной регламентацией может потребоваться частичное укрытие соответствующего оборудования и дезодорирование загрязненного воздуха

2.7. Примеры

На рис. 3–9 приведены примеры технологических линий очистки сточных вод, разработанных и внедренных компанией «Дегремон» на предприятиях аграрно-пищевой промышленности, и их основные эксплуатационные характеристики

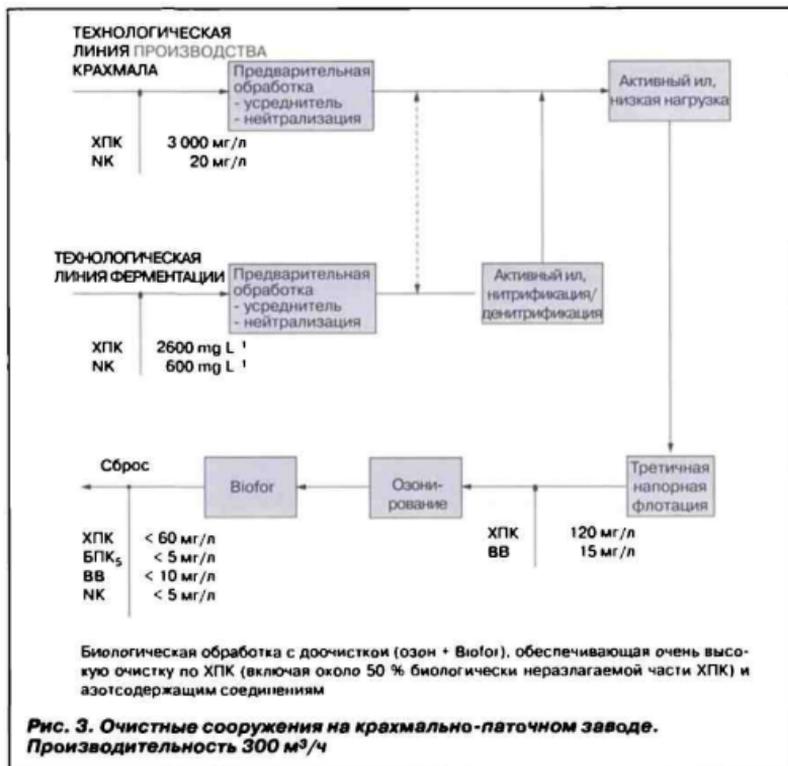
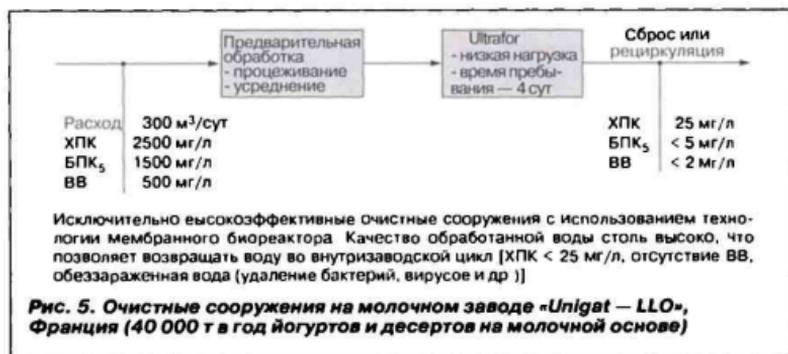
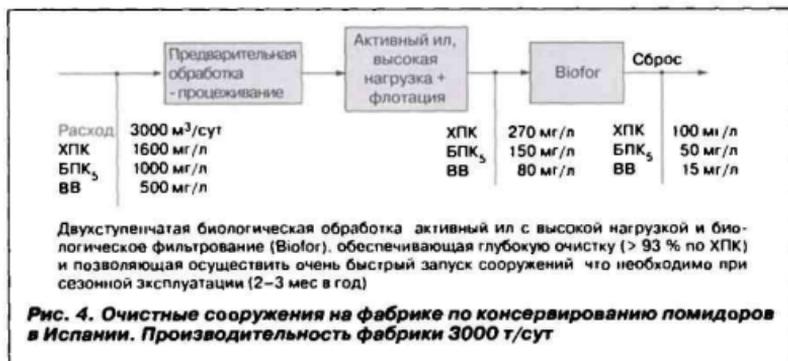
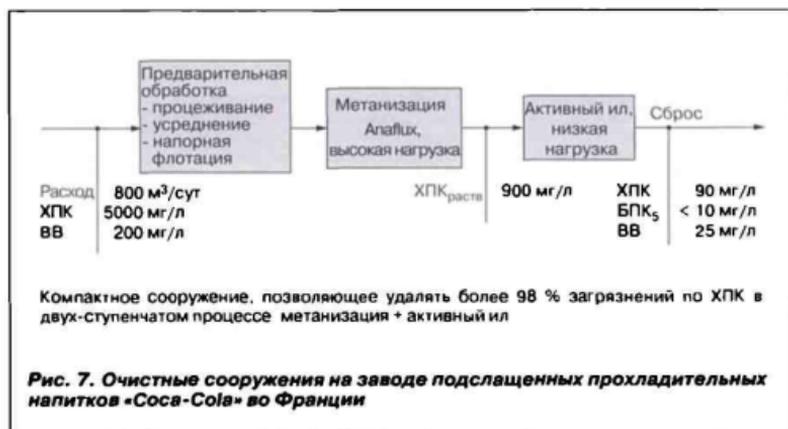
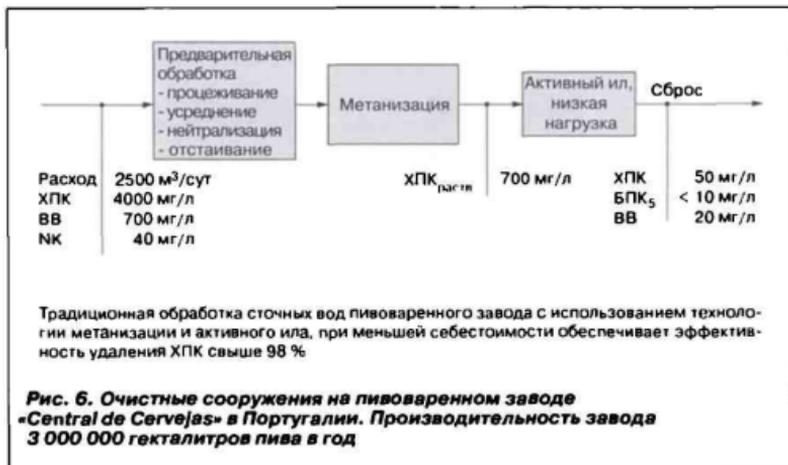
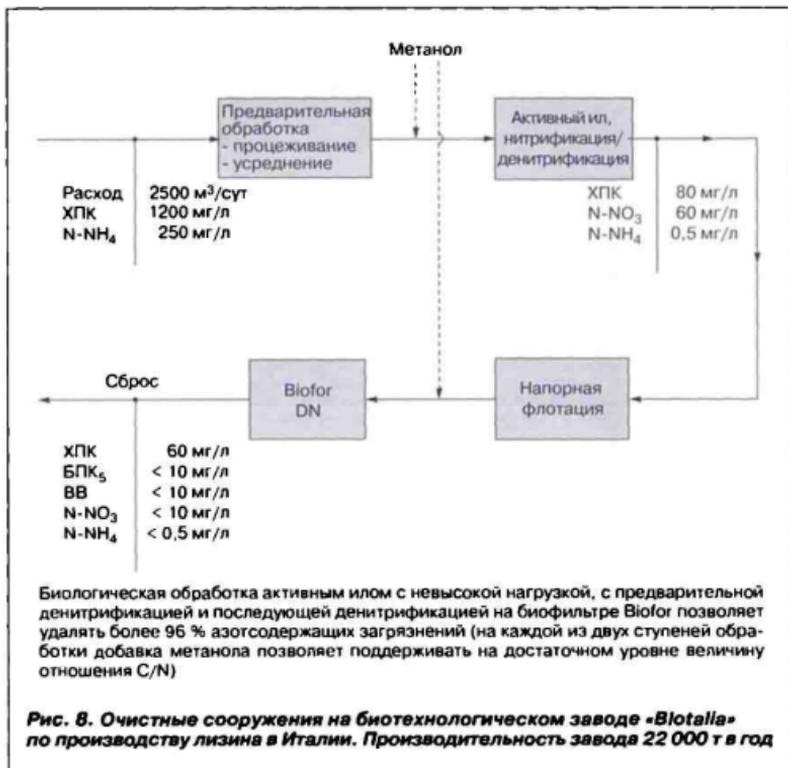




Фото 1. Очистные сооружения дрожжевого крахмального завода «SI Lesaffre» в Маркетт-лез-Иль (Франция). Производительность 4100 м³/сут







3. Целлюлозно-бумажная промышленность

3.1. Производство химической и полухимической бумажной массы

В п. 3.1 рассматривается только производство химической и полухимической бумажной массы (проблемам очистки сточных вод, образующихся при производстве механической и термомеханической бумажной массы, посвящен п. 3.2)

Состав сточных вод, сбрасываемых соответствующими предприятиями, находится в сильной зависимости.

- от типа используемого сырьевого материала (лиственные или хвойные породы деревьев, однолетние растения и др.),
- от типа изготавливаемой бумажной массы (крафт-, би- и моносульфитная или щелочная бумажная масса) и индекса Каппа,
- от последовательности операций отбеливания

Общая блок-схема обработки сточных вод данного производства приведена на рис. 10

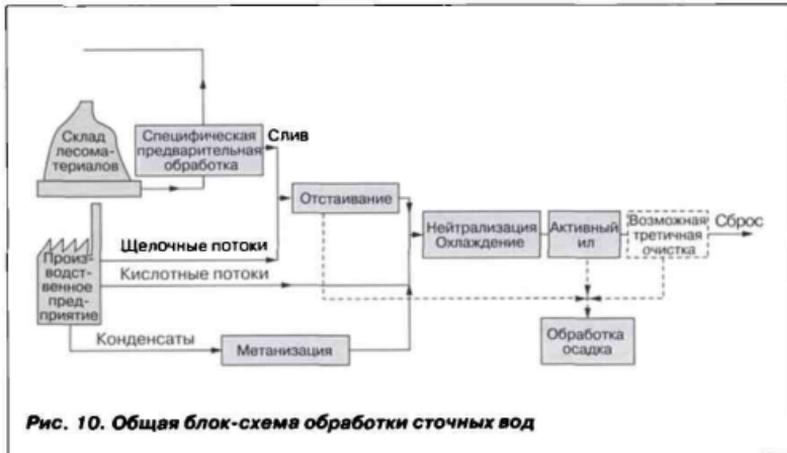


Рис. 10. Общая блок-схема обработки сточных вод

3.1.1. Специфические процессы предварительной обработки

Сточные воды от некоторых производственных циклов могут нуждаться в специальной предварительной обработке, например:

- воды от увлажнения сырьевого лесоматериала должны подвергаться процеживанию, удалению песка с последующей рециркуляцией очищенной воды,
- конденсаты от процессов упаривания подлежат обработке метанизацией,
- щелочные воды с высоким содержанием ВВ подлежат отстаиванию,
- кислые сточные воды с низким содержанием ВВ должны подвергаться нейтрализации

3.1.2. Биологическая обработка

Смесь потоков сточных вод после предварительной обработки охлаждают до 30–35 °С и подвергают биологической обработке обычно активным илом со средней нагрузкой

В зависимости от технологии производства и в первую очередь от последовательности операций отбеливания эффективность биологической обработки составляет 95 % по БПК₅ и 50–80 % по ХПК (при величине отношения ХПК/БПК₅ в исходной сточной воде от 2,5 до 4)

Примечание. На предприятиях, выпускающих продукцию качества TCF или ECF (см. гл. 2, п. 5.6.1), которая полностью или частично лишена хлора, образуются легкобиоразлагаемые сточные воды, поскольку они не содержат хлорпроизводных соединений лигнина

В настоящее время в цикле отбеливания все чаще применяют чистый кислород, поэтому представляется целесообразным предусмотреть обработку сточных вод активным илом также с использованием чистого O₂, что придает процессу очистки следующие преимущества

- улучшение эффективности (по снижению ХПК, содержания загрязнений, окисляемых хлором и его аналогами, и т. п.);
- повышение отстаиваемости осадков при осветлении сточных вод;
- компактность сооружений (за счет более высоких нагрузок).

3.1.3. Третьичная очистка

На заводах по производству химической и полухимической бумажной массы, так же как и на предприятиях по производству бумаги и картона, может потребоваться дополнительная обработка сточных вод, направленная, в частности, на снижение:

- содержания ВВ;
- величины ХПК по коллоидным и бионеразлагаемым загрязнениям;
- цветности;
- содержания загрязнений, окисляемых хлором и его аналогами

В данном случае применимы все технологии, описанные в п. 1.6, причем выбор оптимального по технико-экономическим показателям варианта определяется поставленной целью

3.1.4. Обработка осадков

В тех случаях, когда на заводе установленна печь для сжигания коры, в ней можно также сжигать обезвоженные осадки, формирующиеся на очистных сооружениях.

При отсутствии такого оборудования можно применять любую технологию обработки осадков, рассматривавшуюся в гл. 19, причем выбор конкретного процесса зависит от состава осадка и от его возможного конечного назначения.

3.1.5. Удаление запаха

В случае жесткой регламентации по санитарным нормам может потребоваться частичное укрытие очистных сооружений и установка системы дезодорирования

3.2. Производство бумаги и картона

На предприятиях по производству бумаги и картона, включая бумажные комбинаты, изготавливающие механическую и/или очищенную от типографской краски бумажную массу, используются разнообразные сырьевые материалы и производится

различная конечная продукция (разные типы бумаги и картонов). Это требует четкого знания всех производственных линий для того, чтобы по мере возможности реализовать принципы организации системы водоснабжения (рис. 11), изложенные в п 1



- обработка сточных вод и внутренняя рециркуляция (сокращенная схема);
- специфические виды предварительной обработки сточных вод;
- оптимизация заключительной стадии обработки (вода + осадок), включая возможную рециркуляцию воды (полная схема).

3.2.1. Обработка и внутренняя рециркуляция (сокращенная схема)

Предприятия бумажной промышленности являются крупными потребителями воды и энергии, что с учетом высокой стоимости сырьевых материалов обуславливает необходимость внутренних систем рециркуляции, а именно.

- рекуперации волокон (флотация, отстаивание и др.) для их повторного использования в бумагоделательной машине и иногда рекуперации растворов мелования с помощью ультрафильтрации,
- рециркуляции воды (экономию воды и, главным образом, тепловой энергии) на различных участках бумагоделательной машины или технологического процесса производства бумаги; степень рециркуляции воды и ее качество зависят от типа изготавливаемой бумаги.

3.2.2. Специфические процессы предварительной обработки

В зависимости от типа бумажного производства (бумажная фабрика или целлюлозно-бумажный комбинат), природы используемого сырьевого материала (све-

жая или вторичная целлюлоза) и типа изготавливаемой бумаги (газетная, журнальная, писчая, мелованная, тисненая и др.) следует предусматривать различную специальную предварительную обработку

- изготовление бумаги для гофрированного картона и картона из макулатуры: тонкое процеживание для удаления пластика, металлических скрепок, различного мусора и др.;
- целлюлозно-бумажный комбинат [механическая, термомеханическая, химико-термомеханическая бумажные массы] процеживание, удаление твердых примесей (частицы древесины, песок и т. п.);
- мелованная бумага. предварительная обработка концентрированных сточных вод цеха мелования бумаги в целях разрушения эмульсии;
- удаление типографской краски с макулатуры: флотация сточных вод, образующихся на участке удаления типографской краски, обезвоживание формирующегося при этом осадка

3.2.3. Оптимизация общей технологической линии обработки (вода + осадок) и возможная рециркуляция

После стадии предварительной обработки линия очистки общего потока сточных вод, как правило, включает перечисленные ниже стадии.

■ Первичная обработка

В первичную обработку входят

- предварительная обработка,
- предохранительное процеживание на ситах и/или решетках;
- усреднение в буферном резервуаре (сглаживание пиковых нагрузок, связанных с опорожнением водных контуров, сменой типа продукции и т. п.);
- нейтрализация (потоков от химической промывки полотен);
- отстаивание (на установке *Turbocirculator*, флотацией и т. п.);
- охлаждение (по мере надобности)

■ Биологическая обработка

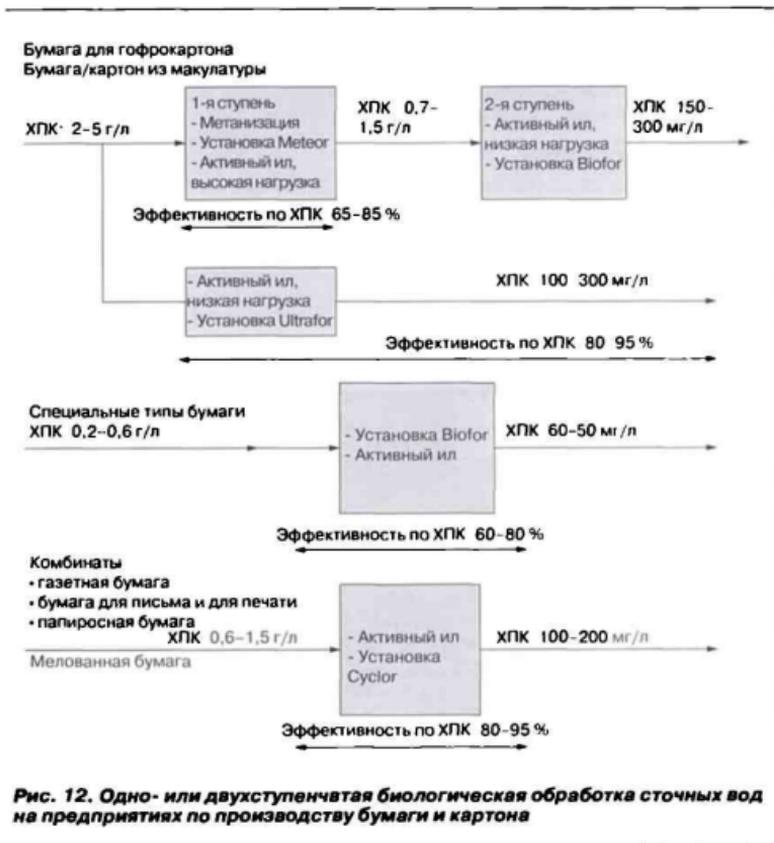
Возможно применение всех технологий, описанных в гл. 11 и 12; при выборе конкретного способа обработки следует учитывать последствия возможного присутствия тех или иных примесей:

- волокон, способных забивать трубы и оборудование;
- кальция, повышенное содержание которого вызывает опасность накилеобразования;
- необработанного латекса;
- абразивных материалов (TiO_2 , CaCO_3 , каолина и т. п.);
- солей, влияющих на коррозионную активность воды.

В зависимости от типа производства, планируемого уровня очистки сточных вод и размеров очистных сооружений биологическую обработку можно проводить в одну или две ступени. На рис. 12 показаны различные линии обработки с указанием обеспечиваемого при этом конечного уровня ХПК

■ Третичная очистка

На стадии третичной очистки может потребоваться дополнительная обработка, направленная на снижение концентрации некоторых специфических загрязнений, таких как ВВ, бионеразлагаемая часть ХПК, цветность и т. д. Применимы любые тех-



нологии, рассмотренные в п. 1.6, при этом для оптимального выбора каждый случай следует рассматривать в отдельности.

■ Обработка осадков

Первичные осадки содержат волокна и минеральные вещества (связанные с использованием макулатуры или добавляемые в процессе производства) Их соотношение в осадках меняется в зависимости от типа производства и от уровня внутренней рекуперации.

Образующиеся первичные осадки.

- либо возвращаются в производственный цикл (например, в производстве бумаги для гофрирования);
- либо обезвоживаются взятые отдельно или в смеси с биологическим илом (ил чаще всего составляет не более 5-15 % от общего количества осадка)

Возможно применение различных процессов обезвоживания, сушки или сжигания (см. гл. 18 и 19) с учетом того, что технико-экономическая оптимизация определяется не только конечной целью, но и составом смешанного осадка (волокна, минеральные вещества, биологический и третичный илы)

■ Удаление запахов

Поскольку обработка сточных вод целлюлозно-бумажной промышленности не порождает специфических запахов, по мере необходимости можно ограничиваться применением традиционных мер

- в газовом контуре метантенков (сульфиды, образующиеся при восстановлении сульфатов);
- на участке обезвоживания осадков.

Вышеизложенная информация иллюстрируется несколькими типичными примерами, приведенными на рис 13–17

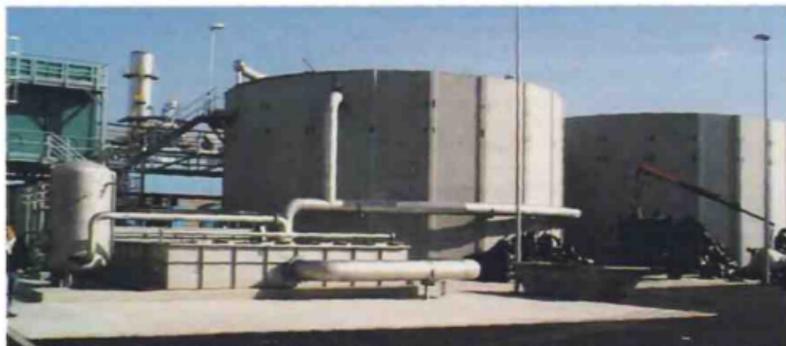
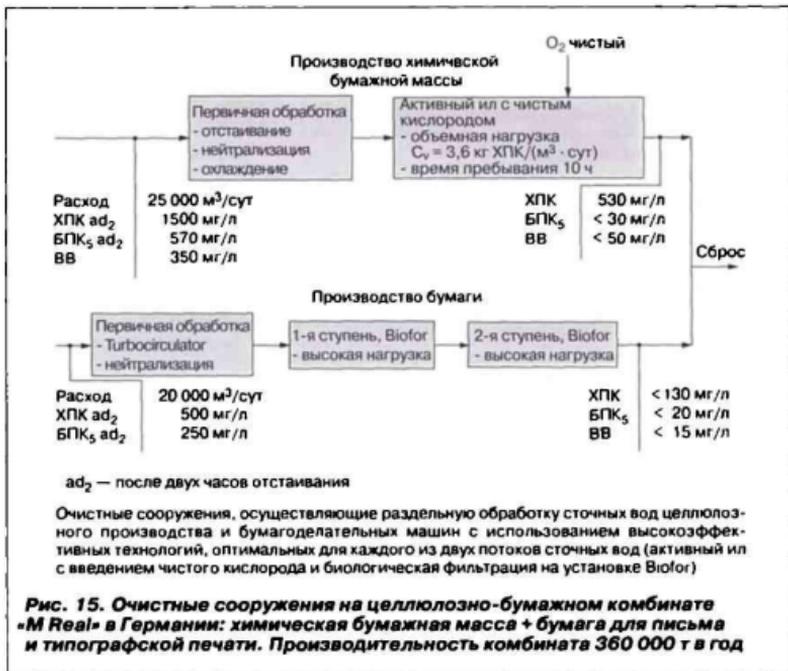
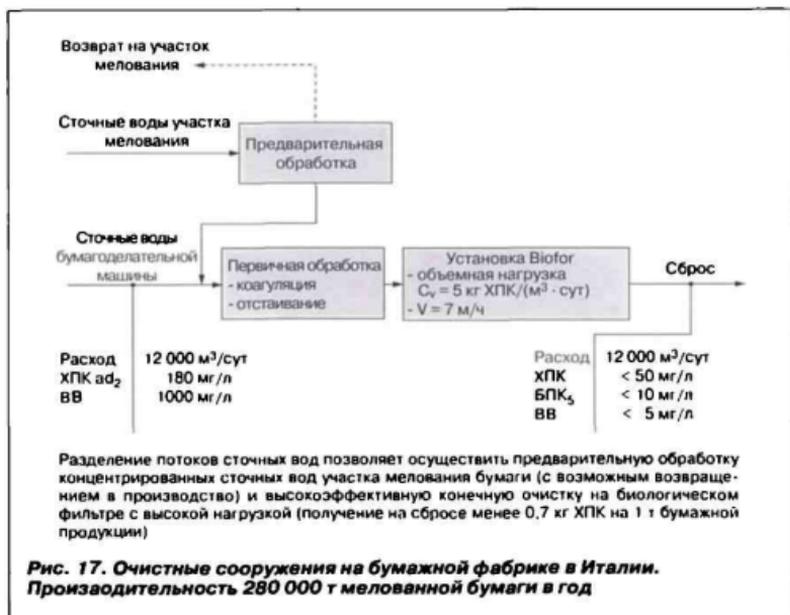


Фото 2. Очистные сооружения на заводе «Holmen Peninsular» в Мадриде (Испания)



Фото 3. Очистные сооружения на бумажной фабрике «Corbehem» компании «Stora Enso» в Па-де-Кале (Франция). Производительность 72 000 м³/сут





4. Нефтяная промышленность

4.1. Добыча нефти

4.1.1. Очистка пластовой воды

Пластовую, или «добываемую», воду, часто извлекаемую из месторождений в виде эмульсии в сырой нефти, отделяют с помощью трехфазных сепараторов, после чего подвергают предварительной обработке в целях удаления углеводородов (в циклоне или пластинчатом сепараторе) и, наконец, доочистке, определяемой в зависимости от назначения очищенной воды (рис. 18) и местных норм на сбросы в окружающую среду

- сброс в открытое море возможен после механической флотации (содержание углеводородов < 40 мг/л), напорной флотации или коалесценции (содержание углеводородов < 10 мг/л), заметим, что коалесценцию следует применять лишь при очень низком содержании взвешенных частиц (минеральные вещества, нефтяной воск, отвердевшие тяжелые углеводороды и т. п.);

- повторное использование путем закачки в пласт допустимо после дегазации (при необходимости) и фильтрования на песчаной загрузке

Повторная закачка в пласт представляет особый интерес, поскольку это не только исключает любые сбросы в море, но также предотвращает заселение «формации» (нефтяного пласта) бактериями, в частности сульфатредуцирующими, и химиче-



скую несовместимость с водой, хранящейся в резервуарах, чего часто не удается избежать при закачке в пласт морской воды. Как правило, повторная закачка не требует удаления кислорода из пластовой воды, однако предполагает достаточно глубокую очистку от нефтяных загрязнений (1–2 мг/л) путем ее фильтрации.

4.1.2. Обработка морской воды в целях ее использования для закачки в пласт

Критерии требуемого уровня осветления воды различаются в зависимости от проницаемости пласта, например:

- удаление 98 % частиц, имеющих размеры > 2 мкм;
- мутность < 0,5 и даже < 0,2 NTU,
- индекс забивания < 3 (подробнее см. гл. 5, п. 4.2.1).

Нужно помнить, что используемая для закачки морская вода может забираться как в прибрежных зонах вблизи эстуария, обогащенных ВВ, так и в открытом море, где содержание ВВ невысоко (< 1 мг/л).

Возможно применение двух достаточно похожих технологических линий обработки



— для прибрежной воды — размещение очистных сооружений на платформах или в прибрежной зоне (рис 19). Первичное осветление может осуществляться отстаиванием или скоростной флотацией (способ **Rictor AquaDAF** — см гл 10, п 4),

— для воды открытого моря — размещение очистных сооружений на буровой платформе (рис 20) Поскольку в данном случае вода, отбираемая на глубине 20 или 30 м, имеет очень низкое содержание ВВ ($< 2 \text{ мг/л}$), для ее обработки достаточно простого фильтрования с предшествующей коагуляцией или без нее



4.2. Транспортировка и слив балластных вод

Балластные воды перекачивают с большим расходом в оборудованные на берегу буферные бассейны-накопители, откуда их со средним расходом направляют на очистные сооружения, после чего, как правило, сбрасывают в море, иногда предварительно смешав с очищенными сточными водами первичной нефтепереработки

В результате хранения в течение нескольких суток балластные воды хорошо отстаиваются, так что технологическая линия обработки включает лишь

- предварительное защитное отделение масел, сглаживающее пиковые нагрузки по углеводородам,
- напорную флотацию с добавкой органического коагулянта, обеспечивающую хорошее отделение нефтяных веществ

4.3. Нефтепереработка

Система отведения сточных вод нефтеперерабатывающего предприятия различна в зависимости от его типа, срока эксплуатации и мощности. На рис 21 показана рекомендуемая (и все чаще используемая) схема разделения сточных вод по меньшей мере на три отдельных потока.

- загрязненные ливневые воды;
- технологические воды от процессов переработки нефти,
- балластные воды.

Такое разделение становится необходимым в случаях, когда стремятся к рециркуляции (предпочтительно после очистки) сточных вод, не содержащих солей,



в систему охлаждения, пожаротушения, а также их возврата в технологический процесс и даже на питание котлов низкого давления или среднего и высокого давления

4.3.1. Нефте содержащие ливневые воды

Нефте содержащие ливневые воды, расход которых колеблется в весьма широких пределах и часто может быть очень большим, собирают в бассейны-накопители и подвергают предварительному отделению нефти с использованием установок предварительного горизонтального отстаивания по нормам Американского института нефти (установок API) и последующего фильтрования или флотации. Иногда после такой обработки эти воды подлежат сбросу

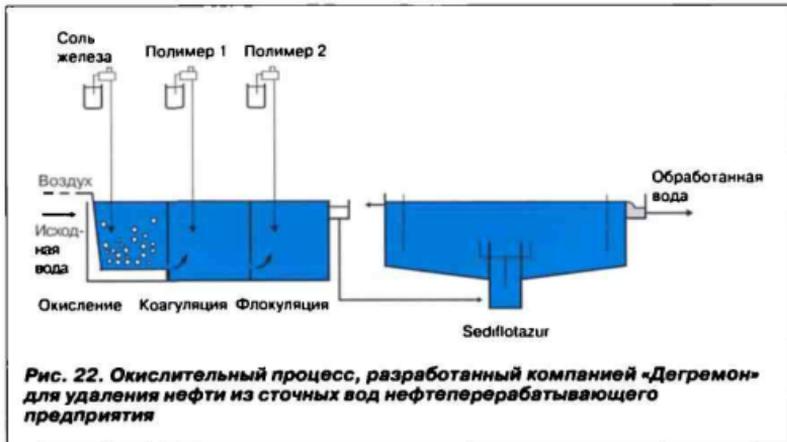
В зависимости от концентрации по БПК₅ или фенолам предварительно обработанная вода может подвергаться перед сбросом дополнительной биологической обработке, часто в таких случаях ее направляют с установленным расходом на сооружения очистки производственных сточных вод (рис 21)

В противном случае для возможного повторного использования предварительно обработанной воды, например в качестве подпиточной воды для систем охлаждения, требуется осуществить ее доочистку в целях удаления ВВ и (иногда) остаточных фенолов. Такую обработку могут обеспечить биофильтры (орошаемые или Biofor)

4.3.2. Производственные сточные воды

Производственные сточные воды поступают с различных установок предприятия нефтепереработки (атмосферной дистилляции, вакуумной дистилляции, жидкого ка-

талитического крекинга, водородной десульфурации и других видов крекинга, легкого крекинга и т. п.) Сточные воды от установок обессоливания и жидкого каталитического крекинга содержат наибольшее количество солей, часто загрязнены сульфидами и в силу этого нуждаются в предварительной обработке путем их отдувки и/или окисления (рис. 22) перед стадиями отделения масел и биологической обработки



Отделение таких сточных вод от всех остальных потоков позволяет более эффективно обработать сульфиды, а в случае необходимости — при слишком высоком содержании солей — их можно затем объединить с балластными водами.

На рис. 23 показана технологическая линия полной обработки, обеспечивающая рециркуляцию очищенных производственных сточных вод в систему подпитки кот-



лов. Отметим, что в данном случае **балластные воды** (часто морская вода) должны обрабатываться и сбрасываться отдельно, поскольку их солесодержание препятствует какому-либо повторному использованию

4.3.3. Три примера типовых линий обработки сточных вод

Нижеследующие примеры иллюстрируют варианты технологических линий обработки сточных вод от нефтеперерабатывающих предприятий с указанием результатов, получаемых при расширении масштабов внутренней рециркуляции и/или повторного использования этих вод, что позволяет снизить забор природных вод, но в то же время приводит к необходимости обработки более концентрированных потоков ПСВ.

4.3.3.1. Нефтеперерабатывающее предприятие «NPC» в г. Тебриз (Иран)

Относительно несложное предприятие «NPC» имеет цех каталитического реформинга, продукция которого направляется на установку производства ароматических соединений и синтетического каучука

К производственным сточным водам, расход которых в сухой сезон составляет $200 \text{ м}^3/\text{ч}$, через буферный бассейн объемом 6000 м^3 добавляются с расходом $30 \text{ м}^3/\text{ч}$ загрязненные ливневые воды (мгновенный расход последних при поступлении составляет примерно 833 л/с , или $3000 \text{ м}^3/\text{ч}$)

В табл. 4 приведены концентрации загрязнений (в миллиграммах на литр) в производственных сточных водах предприятия «NPC» и соответствующие нормы их сброса.

Это относительно новое (1996–1998) предприятие характеризуется удачной оптимизацией водопотребления, вследствие чего его сточные воды достаточно концентрированы.

Отметим, что хозяйственно-бытовые сточные воды выделены в отдельный поток и очищаются отдельно на биологических сооружениях, аналогичных сооружениям обработки ГСВ.

Таблица 4
Загрязнения в производственных сточных водах предприятия «NPC» и нормы их сброса, мг/л

Показатель	Производственные сточные воды	Нормы для сброса
ХПК	965	≤ 50
БПК ₅	470	≤ 20
S ⁻	< 2	-
ВВ	200	≤ 30
Общее содержание маслопродуктов	225	≤ 5
Фенол	1	1
Общее содержание растворенных солей	< 500	-

В состав линии обработки производственных сточных вод входит установка типа API для отделения масел, бассейн-усреднитель, флотатор, азротенк с низкой нагрузкой и вторичный осветлитель

В силу необходимости гарантировать степень очистки, позволяющую повторно использовать в производстве обработанную воду (содержание по ХПК около 50 мг/л, что соответствует его снижению примерно на 95 %), технологическую линию потребовалось включить стадию третичной очистки, которая включает отстойник, за которым установлены три двухслойных фильтра и три фильтра с активированным углем

Обработка осадков включает центрифугирование избыточного активного ила, который затем направляют на сжигание в смеси со всеми осадками, содержащими углеводороды (осадки установок API, отложения на наклонных плоскостях, донные осадки нефтяных танков и флотаторов), а также с отходами от установок производства синтетического каучука (бутадиеновый каучук и др.)

Примечание Компания «Дегремон» разработала и поставила весь комплекс оборудования для очистки питающей воды и сточных вод этого нефтеперерабатывающего предприятия (см также гл. 25, п 2 3)

4.3.3.2. Нефтехимический комплекс «Shell Chimie» (Франция)

На рис. 24 показана традиционная линия обработки сточных вод, используемая на нефтехимическом комплексе «Shell Chimie» и ему подобных предприятиях. Основной проблемой этой линии остается низкая способность активного ила к осаждению (из-за влияния ПАВ), поэтому необходима стадия третичной флотации для обеспечения низкого содержания ВВ и соответственно БПК и ХПК в осветленной воде



4.3.3.3. Нефтеперерабатывающий завод «Pemex Salina Cruz» (Мексика)

Наиболее крупный в Мексике нефтеперерабатывающий завод «Pemex Salina Cruz» (330 000 баррелей в год) до 1998 г. снабжался водой из водохранилища, образованного плотиной, тогда как сточные воды предприятия после отделения нефтепродуктов и не всегда эффективной обработки в неаэрируемых лагунах сбрасывались в море. Вынужденная уменьшить забор воды на производственные нужды в пользу приоритетного использования водохранилища для питьевого водоснабжения, компания «Pemex» разработала программу развития системы водоснабжения и во-

доотведения, реализация которой была предусмотрена по инвестиционной схеме BOT (от англ. *Build-Operate-Transfer* — строительство-эксплуатация-передача) в три очереди. Полученные и ожидаемые результаты в отношении водозабора из природной среды приведены в табл. 5

Таблица 5
Результаты преобразования системы водоснабжения и водоотведения на нефтеперерабатывающем заводе «Pemex Salina Cruz»

Использование воды из водохранилища	Расход до 1998 г., м ³ /ч	Экономия воды, м ³ /ч			Расход после реализации всей программы развития, м ³ /ч
		I очередь	II очередь	III очередь	
На подпитку котлов	500	500	-	-	-
На подпитку систем охлаждения	1750	350	330	870	200
В качестве рабочей воды различного назначения	230	-	-	-	230
Всего по предприятию (экономия на водозаборе)	2480	850 (35 %)	330	870	430 (85 %)
Прочее использование (питьевая вода, сельское хозяйство, больница и т. п.)	440	-	-	-	440
	2920				870

После введения в строй третьей очереди проекта суммарный водозабор нефтеперерабатывающего предприятия из водохранилища будет ограничен 430 м³/ч, т. е. суммарная экономия воды по сравнению с 1998 г. составит около 85 %. Отметим, что для дальнейшего снижения водопотребления потребуются повысить степень концентрирования в градирнях, а для предотвращения коррозии помимо имеющихся систем очистки нужно установить систему деминерализации подпиточной воды (получаемой из производственных и городских сточных вод).

■ Первая очередь (1999 г.)

В первую очередь программы развития вошли системы.

— **опреснения морской воды** обратным осмосом производительностью 560 м³/ч для питания котлов через уже существующие ионообменные установки,

— **полной рециркуляции производственных сточных вод** (350 м³/ч), перекачиваемых из существующих лагун через установку флотации и блок биологической обработки с нитрификацией, за которым следует декарбонатация известью в установке **Densadeg** и однослойное фильтрование на песке. Очищенная вода повторно используется в системах пожаротушения и для подпитки в градирни

В табл. 6 приведены характеристики производственных сточных вод (расчетные и фактические) и рециркулируемой обработанной воды.

Можно видеть, что именно из-за недостаточной эффективности очистки сточных вод в лагунах повторное использование обработанной таким образом воды на заво-

Таблица 6

Параметр	Единица измерения	Проектные данные (при строительстве завода)	Фактические данные (усредненные) после I очереди		
		Исходная вода	Обработанная вода (в лагунах)	Исходная вода	Обработанная вода
Средний расход	м ³ /ч	360	356	360	356
pH	-	7,5	7,6 макс.	7,8	7,2
БПК	мг/л	39-110	23	37,6	12,7
ХПК	мг/л	100-310	91	87,2	30,1
ВВ	мг/л	48,5	1	15,7	1,1
Масла и жиры	мг/л	3-10	0	6,5	0,1
N-NH ₄	мг/л	33-69	< 0,4	47,6	0,1
PO ₄ ³⁻	мг/л	0-3	< 0,5	0,4	0
Фенолы	мг/л	0,14	0	0	0
Щелочность	мг/л CaCO ₃	100-200	< 150	180	49,2
Ca ²⁺	мг/л CaCO ₃	60-280	< 100	261,5	40,7
Mg ²⁺	мг/л	40-120	55	91,1	29,2
SiO ₂	мг/л	1-7	< 15	23,1	16,1
Фекальные колиформы	КОЕ в 100 мл	1000-5000	-	320	38,5
S ²⁻	мг/л	8-64	1	0	0

де было невозможным. После реализации первой очереди программы развития системы водоснабжения и водоотведения завода вода из лагун после соответствующей обработки уже не имеет характеристик, неблагоприятных для системы охлаждения со степенью концентрирования около 3, в частности, по таким загрязнителям, как ВВ, БПК, NH₄ и PO₄, содержание которых становится очень незначительным.

■ Вторая очередь (2002 г.)

В целях дальнейшего снижения объема водозабора в г. Салина Крус были построены сооружения очистки ГСВ. После традиционной биологической обработки с малой нагрузкой, обеспечивающей нитрификацию и денитрификацию, эти сточные воды проходят третичное фильтрование и присоединяются к обработанным производственным сточным водам.

■ Третья очередь

Для дальнейшей экономии природной воды было предложено **увеличить степень рециркуляции воды в градирнях** с нынешнего значения, равного 3, до 8. Однако это предполагает принятие следующих мер:

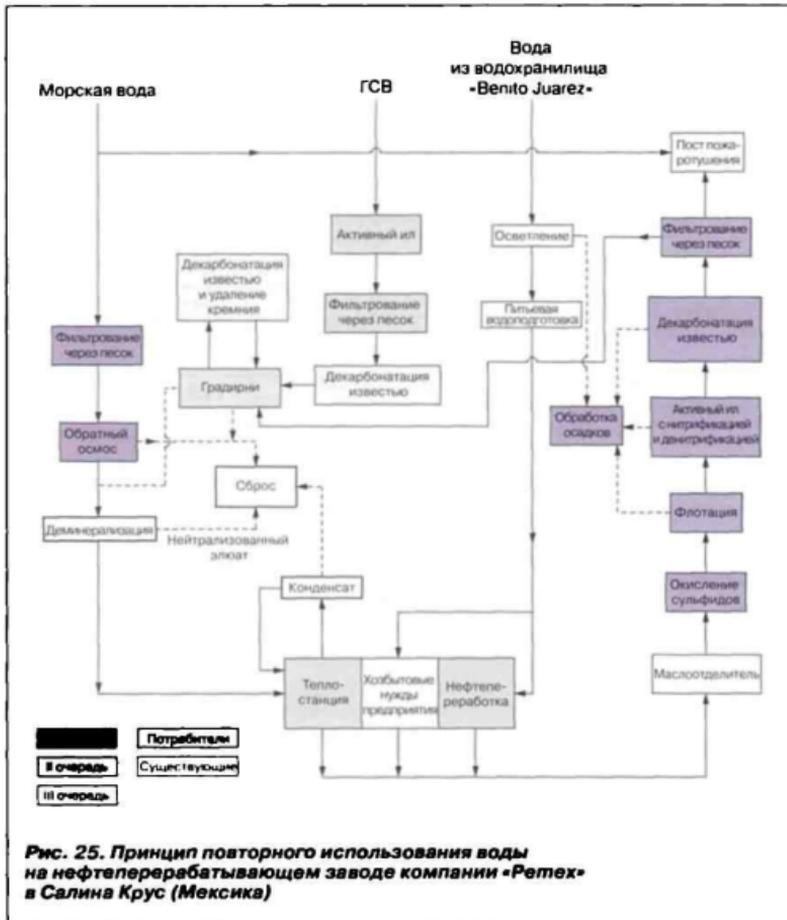


Рис. 25. Принцип повторного использования воды на нефтеперерабатывающем заводе компании «Ретех» в Салина Крус (Мексика)

— улучшение показателей жесткости подпиточной воды, поскольку основным источником такой воды являются ГСВ, их следует подвергать декарбонатации.

— поддержание качества воды, возвращаемой в системы охлаждения, путем снижения ее жесткости и содержания в ней диоксида кремния обработкой в **обводной линии** с установкой **Densadeg**, которая работает в режиме декарбонатации и удаления кремния с помощью введения извести и магнезии.

На рис. 25 показана схема конечной организации всей системы сооружений с тремя последовательными очередями проекта (выделены различным цветом).

4.4. Осадки и отходы

Донные осадки установок API для отделения масел (песок, глина и нефтепродукты, приносимые главным образом ливневыми водами) извлекаются и чаще всего обрабатываются при нагревании в трехфазном сепараторе, при этом

- отделенные углеводороды возвращаются на вход нефтепереработки,
- отмытый песок отправляется на свалку,
- вода подается на вход установки API

В тех случаях, когда кондиционирование воды осуществляют только с помощью органических полимеров, **плавающие нефтепродукты** совместно с флотационным шламом направляют в резервуары с наклонным дном.

Биологические илы обезвоживают и при необходимости стабилизируют известью, перед вывозом на захоронение их можно смешивать с осадками, образующимися при третичной очистке (декарбонатация, фильтрование и т.п.), а в случае утилизации илов в сельском хозяйстве проводится их предварительное компостирование

4.5. Отработанные содовые растворы

Отработанные содовые растворы весьма небольшого объема содержат значительные количества серы (от 2 до 5 г/л) и иногда фенолов, что обуславливает необходимость специальной их обработки для удаления серы, а в случае надобности — и фенолов

Удаление серы можно осуществить путем подкисления воды до значения $pH = 3-3.5$ и отдувки образующегося H_2S нейтральным газом. После такой обработки сточные воды направляют в резервуар-накопитель, откуда их очень низким расходом подают на основные очистные сооружения (на участок удаления серы, если он имеется, в противном случае — в поток перед установкой напорной флотации). Удаление фенолов происходит в процессе биологической обработки общего потока сточных вод

5. Теплоэлектростанции

Мы рассмотрим только две основные проблемы, возникающие при эксплуатации теплоэлектростанций, а именно.

- обработка сточных вод от локальных систем удаления серы и даже оксидов азота (NO_x), известных также под названием систем удаления серы (десульфуризация) из дымовых газов (англ. *Flue gas desulphurisation* — FGD),
- создание технологических линий обработки сточных вод, обеспечивающих их повторное использование для водоснабжения станций в целях снижения забора природных вод (засушливые зоны, мощное давление со стороны служб охраны окружающей среды)

Заметим также, что на теплоэлектростанциях существуют и другие проблемы, связанные с извлечением ряда характерных загрязнений, перечисленных в гл. 2, п. 5 12, табл. 65, из сточных вод от локальных хранилищ топлива (традиционные способы отделения масел), из вод, транспортирующих летучую золу (на станциях, работающих на твердом топливе), из сточных вод от чистки рекуператоров тепла. Они сугубо специфичны для каждой конкретной станции. Так, например, в случае обработки воды, содержащей золу, загрязнения (а следовательно, и способ их

удаления) в значительной степени определяются химическим характером транспортируемой золы (щелочная или кислая)

5.1. Обработка серосодержащих сточных вод от процессов очистки дымовых газов теплоэлектростанций

5.1.1. Происхождение серосодержащих сточных вод и их свойства

При использовании ископаемого жидкого или твердого топлива, обогащенного серой, образуются газообразные отходы в виде дыма, содержащего значительные количества SO_2 . Этот дым следует промывать, чтобы удалить из него источник загрязнений, приводящий к возникновению кислотных дождей, которые оказывают весьма неблагоприятное действие на окружающую среду.

Отметим, что теплоэлектростанция мощностью 750 МВт вырабатывает в среднем около 2,5 млн $\text{Nm}^3/\text{ч}$ дыма, из которых следует удалять от 4 до 5 т SO_2 ежечасно.

Классический способ удаления серы состоит в двухступенчатой очистке дымовых газов мокрым способом

- охлаждение дыма до температуры 50 °С в полузакрытой системе при величине рН, равной 0,5, часть получаемого раствора сливают на сооружения очистки сточных вод,

- промывка газов суспензией CaCO_3 или $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в полузакрытой системе при величине рН, равной примерно 4, часть получаемого раствора сливают на сооружения очистки сточных вод.

Эти сливы необходимо подвергнуть обработке, чтобы привести их в соответствие требованиям действующих норм на сброс загрязнений в водоемы. Они представляют собой кислые рассолы, содержащие суспензию гипса и, в зависимости от конкретного случая, SO_2 или смесь $\text{SO}_2 + \text{NO}_x$. В них можно также обнаружить разнообразные металлы, концентрация которых относительно невелика, однако превышает обычные нормы сброса (различные в разных странах — см. табл. 7). Соответствующую обработку обычно называют обезвреживанием дымовых газов, хотя фактически речь идет, разумеется, об обработке сточных вод от установок по удалению серы из дымовых газов.

5.1.2. Сооружение для очистки сточных вод от установок очистки дымовых газов

Следует отметить, что иногда на некоторых промышленных предприятиях предусматривается централизованная очистка всего комплекса сточных вод теплоэлектростанции

- сливов систем охлаждения,
- вод, содержащих золу,
- сточных вод от процесса очистки дымовых газов,
- регенерационных растворов (элюатов) от процессов деминерализации,
- различных дренажных вод.

Обработка общего потока возможна, но приводит к разбавлению в нем сульфатов и металлов, вызывает необходимость увеличения габаритов требуемого оборудования и, что самое важное, приводит к возрастанию общего количества сбрасываемых загрязнений (по меньшей мере на килограммы в сутки). По этой причине часто более целесообразной является раздельная обработка сточных вод от очист-

Таблица 7
Примерный состав сточных вод от установок по обезвреживанию
дымовых газов

Характеристика	Единица измерения	Значение/концентрация	Характеристика	Единица измерения	Значение/концентрация
pH	-	3-4	Cr	мг/л	0,5
Температура	°С	40-50	Cd	мг/л	0,05-0,10
ВВ	г/л	10-20	Pb	мг/л	0,5-1,5
Углеводороды	мг/л	2-10	Hg	мг/л	0,008-0,050
ХПК	мг/л	250-500	Cu	мг/л	0,2-0,8
Cl	г/л	15-30	Zn	мг/л	0,5-1,0
SO ₄ растворенные	г/л	2-3	As	мг/л	0,3-0,8
F	мг/л	40-100	V	мг/л	2-15
Mg	мг/л	50-4000	Se	мг/л	1-4
Ca	мг/л	300-5000	Be	мг/л	1-2
N	мг/л	5-600	Sb	мг/л	0,1-0,4
CN	мг/л	0,1-0,5	B	мг/л	1-10

ки дымовых газов, расход которых относительно невелик (от 10 до 60 м³/ч), на отдельных установках. Обработка именно такого типа и рассматривается нами далее.

В зависимости от требуемых гарантированных показателей качества очищенных вод и характеристик подлежащих обработке сточных вод (только SO₂ или SO₂ + NO_x) возможны несколько вариантов обработки. Следует отметить, что окисление воздухом не является необходимым, поскольку оно уже имело место при контакте воды с избытком кислорода в колоннах мокрой газоочистки.

Наиболее распространенная из используемых технологических линий обработки, на которую подаются сливы колонн мокрой газоочистки, поток общих сточных вод, вода из резервуаров полной продувки промывных колонн, а также осадки, включает следующие процессы.

- нейтрализация, снижение концентрации гипса (добавление извести и осаждение гипса);
- коагуляция и осаждение металлов (добавление осадителей на основе восстановленной серы);
- флокуляция;
- осветление в тонкослойном отстойнике типа **Densadeg** (вся оснастка этого аппарата должна иметь специальную конструкцию, предотвращающую его засорение);
- обработка осадков (сгущение и обезвоживание)

При наличии оксидов NO_x к этой линии потребуется добавить биологическую нитрификацию—денитрификацию на биофильтре **Biofor** после обязательной предварительной проверки возможности осуществления этого процесса. Дело в том, что небольшие количества металлов и в особенности резкие изменения общего солевого содержания могут нарушить нормальное течение биологического процесса

В любом случае подобная обработка позволит обеспечивать на выходе гарантированные показатели по содержанию металлов и фтора. В то же время гарантии по содержанию SO_4^{2-} на уровне значительно более низком, чем 2000 мг/л, соблюсти невозможно (слишком высокая растворимость гипса), и это приводит к попытке смешивания сточных вод от очистки дымовых газов с другими потоками, формируемыми на предприятии. Для соблюдения требуемых гарантий на содержание таких трудноудаляемых элементов, как бор, бериллий, ванадий, может понадобиться добавление по меньшей мере еще одной дополнительной стадии очистки на селективной ионообменной смоле. Наконец, в случае присутствия в сточных водах значительных концентраций магния следует принимать во внимание его осаждение

Таблица 8
Результаты работы очистных сооружений сточных вод
на теплоэлектростанции компании «EDF» в Кордеме;
ХПК снижается от 200 до 400 мг/л на входе и от 90 до 150 мг/л на выходе

Характеристика	Единица измерения	Требуемые гарантируемые показатели	Получаемые результаты
pH	-	6,5-8,5 (возможно до 9)	8,3
Температура	°C	-	40
ВВ	мг/л	< 30 (часто < 15)	7
ХПК	мг/л	150	130
Углеводороды	мг/л	5	0,05
Сульфаты SO_4 растворенные	мг/л	2000	1720
F	мг/л	15 (часто < 5)	15
Mg^{2+}	мг/л	-	
Ca	мг/л	-	
CN	мг/л	< 0,1	< 0,05
Al	мг/л	< 2	< 0,1
Cr общий	мг/л	< 0,1	< 0,05
Cd	мг/л	< 0,003	0,01
Fe	мг/л	< 0,5	0,15
Pb	мг/л	< 0,01	< 0,01
Hg	мг/л	0,002	< 0,001
Cu	мг/л	< 0,05	0,04
Zn	мг/л	< 0,05	0,04
As	мг/л	< 0,005	< 0,001
V	мг/л	-	0,03
Se	мг/л	-	0,03
Be	мг/л	< 0,0015 (только в США)	-
B	мг/л	< 1 (редко)	-

в форме гидроксида, который значительно снижает поток твердых веществ при сгущении и тем самым уменьшает скорость отстаивания

В табл 8 приведены обычные требуемые гарантированные показатели и фактические результаты, полученные на одном из эксплуатируемых в настоящее время очистном сооружении

Следует также отметить, что в настоящее время все чаще требуется гарантированное обеспечение величины ХПК < 150 мг/л При ХПК на входе от 250 до 500 мг/л для достижения такого результата часто требуется третичная очистка (обычно биологическая, но при повышенном солесодержании и невысоких расходах — на активированном угле)

Отметим, что, поскольку значительная часть исходной ХПК зачастую обусловлена ВВ, присутствующими в сточных водах, удаление последних позволяет снизить ХПК на выходе сооружения до < 150 мг/л

В заключение укажем, что для фтора гарантированный показатель < 15 мг/л может быть обеспечен путем соосаждения CF_2 с гипсом тогда как гарантия на остаточное содержание < 5 мг/л может быть обеспечена лишь в том случае, если уже в исходной воде содержание фтора не превышает 5 мг/л Для наиболее типичных ситуаций, когда содержание фтора превышает это значение, необходима третичная обработка, например, с использованием сульфата алюминия

5.2. Повторное использование сточных вод в качестве источника подпиточной воды

В засушливых зонах земного шара промышленники все чаще склонны (скорее, вынуждены) ограничивать и даже избегать любого забора природных пресных вод Для этого им приходится использовать сточные воды — чаще всего городские (как на предприятии «Pemex Salina Cruz» — см п 4), однако можно также использовать и сточные воды других отраслей промышленности Именно такой случай имеет место на электростанциях нового типа, осуществляющих когенерацию, т. е. комбинированное производство тепловой и электрической энергии, которые часто имеют крупного потребителя своей продукции (пара и электричества), поставляющего им в обмен свои собственные ПСВ, прошедшие более или менее интенсивную обработку

Типичным примером такого предприятия служит электростанция компании «Gregory Power Partners» (Корпус-Кристи, шт Техас, США), сотрудничающая на поданных описанных условиях с глиноземной фабрикой Фабрика сбрасывает конденсаты, имеющие невысокое содержание солей при высокой концентрации ОВ, которая меняется в весьма широких пределах Содержание ООУ в этих конденсатах, обычно составляющее 30 мг/л и при пиковых значениях достигающее 60 мг/л, необходимо снизить до уровня 0,5 мг/л, что отвечает требованиям к подпиточной воде для оборудования электростанции Поскольку расхода образующегося конденсата часто оказывается недостаточно для удовлетворения всех потребностей, предусматривается забор воды из р Сан-Патрисио для систем охлаждения (384 м³/ч) и подпитки котлов (830 м³/ч) электростанции

В табл 9 и 10 приведены прогнозируемые результаты анализа обрабатываемой воды и гарантированные показатели очистки, на практике же установлено, что в течение более 98 % времени работы после выхода в устойчивый режим фактическое общее содержание углеродов в воде, поступающей из двух источников конденсата (варочные котлы боксита и выпарные аппараты), оказалось ниже 25 и 45 мг/л соответственно.

Таблица 9
Результаты анализа обрабатываемой воды

Характеристика	Единица измерения	Варочный котел	Выпарной аппарат	Речная вода (р. Сан-Патрисио)
Кальций	мг/л по CaCO ₃	2	2	2
Магний	мг/л по CaCO ₃	0,5	0,5	0,5
Натрий	мг/л по CaCO ₃	40	20	32
Калий	мг/л по CaCO ₃	1	1	1
Аммоний	мг/л по CaCO ₃	150	75	120
Алюминий	мг/л по CaCO ₃	45	23	36,2
Сумма катионов	мг/л по CaCO ₃	238,5	121,5	191,7
Титр ТА	мг/л по CaCO ₃	175	70	133
Титр ТАС	мг/л по CaCO ₃	195	98	156,2
Сульфаты	мг/л по CaCO ₃	2	2	2
Хлориды	мг/л по CaCO ₃	40	20	32
Нитраты	мг/л по CaCO ₃	0,5	0,5	0,5
Фосфаты	мг/л по CaCO ₃	0,5	0,5	0,5
Фториды	мг/л по CaCO ₃	0,5	0,5	0,5
Сумма анионов	мг/л по CaCO ₃	238,5	121,5	191,7
pH	-	10,5	10,4	10,46
Удельная проводимость	мкСм/см	120	80	104
Железо	мг/л по Fe	1,5	0,05	0,92
Марганец	мг/л по Mn	0,03	0,03	0,03
Барий	мг/л по Ba	0,01	0,01	0,01
Стронций	мг/л по Sr	0,01	0,01	0,01
Кремний (общий)	мг/л по SiO ₂	1	0,1	40
ООУ	мг/л по С	75	30	58
БПК	мг/л	124	63	100
ХПК	мг/л	356	129	265
ВВ	мг/л	20	20	20
Масла и жиры	мг/л	30	10	22

Таблица 10
Гарантированные показатели обработки

Удельная проводимость	0,1 мкСм/см при 25 °С
Диоксид кремния	10 мкг/л по SiO ₂
ООУ	0,5 мг/л
Железо	< 10 мкг/л
Медь	10 мкг/л
Масла и жиры	0,02 мг/л

На рис. 26 показана блок-схема обработки, которая после проверки на пилотной установке была реализована в полном масштабе и с 2000 г эксплуатируется в непрерывном режиме

На очистных сооружениях когенерационной электростанции компании «Gregory Power Partners» осуществляется:

- биологическая обработка конденсатов глиноземного производства на биофильтрах Biofor. Преимущественно биоразлагаемая природа ОВ, содержащихся в конденсатах, позволяет обеспечить постоянное удаление 70–80 % ООУ на шести установках Biofor;
- освещение в двух отстойниках Densadeg смеси очищенной воды, прошедшей через Biofor, с речной водой; состав этой смеси (по объему) может изме-

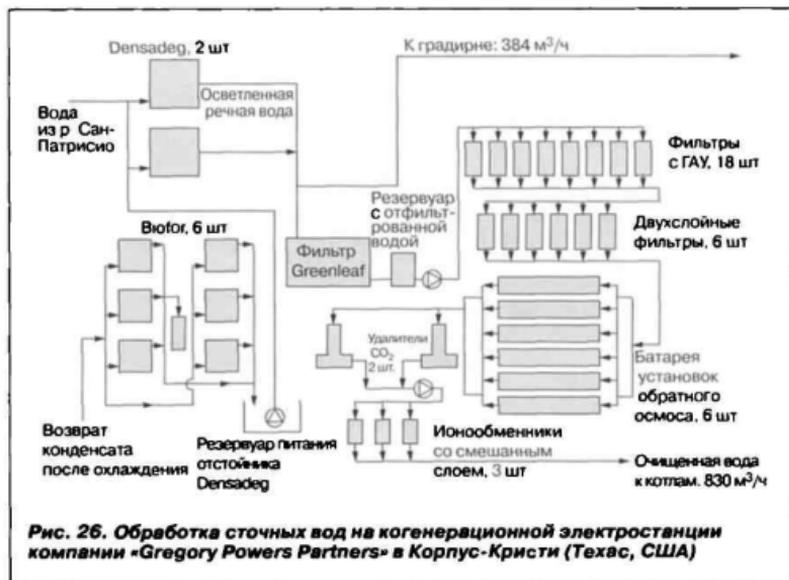


Рис. 26. Обработка сточных вод на когенерационной электростанции компании «Gregory Powers Partners» в Корпус-Кристи (Техас, США)



няться в пределах от 0 до 100 %, но, как правило, отношение обработанной воды к речной составляет 80 : 20

Предусмотрена система доочистки и деминерализации этого смешанного потока с расходом до 830 м³/ч для завершения глубокого удаления ООУ и получения воды с удельным сопротивлением больше 10 МОм · см В эту систему (рис 27) входят следующие стадии обработки

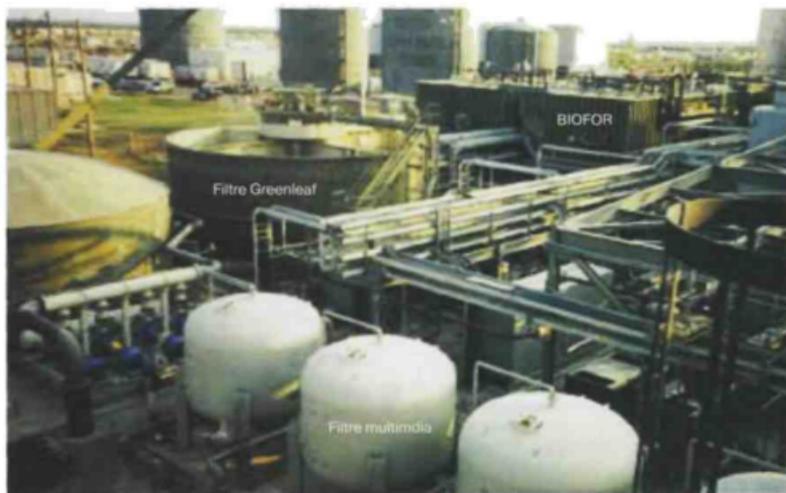


Фото 4. Когенерационная электростанция компании «Gregory Powers Partners» в Корпус-Кристи (Техас, США)

- третичное фильтрование на фильтре **Greenleaf**.
 - **адсорбция на активированном угле** (защита от биообрастания путем регулярной очистки острым паром ежемесячно или один раз в 2 мес).
 - дополнительное **фильтрование** на двухслойной загрузке, обеспечивающее удаление угольных микрочастиц и достижение индекса забивания (см гл 5, п 4 2.1), совместимого с процессом обратного осмоса.
 - **обратный осмос** и обработка на смешанном слое ионитов завершают удаление ООУ (см табл 10) и обеспечивают необходимую деминерализацию
- Отметим, что после полугодовой эксплуатации было принято решение исключить из технологической линии очистных сооружений электростанции обработку на активированном угле, применение которого (сопряженное к тому же со значительными эксплуатационными трудностями) оказалось нецелесообразным вследствие почти полного отсутствия пиковых значений содержания ООУ в исходных сточных водах

Несмотря на определенную сложность примененной технологической линии, первые годы эксплуатации очистных сооружений доказали надежность и простоту функционирования системы, что обусловило финансовую целесообразность проекта комплексной когенерационной электростанции

На фото 4 показана часть очистных сооружений биофильтр **Biofor**, фильтр **Greenleaf** и многослойный фильтр. Отметим, что все установки (в том числе и отстойник **Densadeg**) установлены над уровнем земли и изготовлены из стали, что было обусловлено необходимостью реализации проекта когенерационной электростанции в короткие сроки (18 мес)

6. Химическая промышленность

6.1. Общие положения

Производства химической промышленности очень разнообразны, и обычно их относят к одной из следующих отраслей

- нефтехимия,
- неорганическая химия,
- специальная химия,
- тонкая химия,
- фармацевтика

Столь обширное разнообразие видов производства не позволяет установить типовую схему обработки или хотя бы сформулировать простые рекомендации общего характера, которые были бы более детальны, чем общие принципы организации технологической линии обработки ПСВ, рассмотренные в п 1

Кроме того, на каждом предприятии, как правило, производится широкий ассортимент продукции (соединения более или менее сложного молекулярного состава), который ежегодно может претерпевать значительные качественные и количественные изменения, что неизбежно влечет за собой необходимость регулярной ревизии схемы образования сточных вод и технологии их обработки

При этом необходимо еще раз подчеркнуть, что химическая промышленность, как никакая другая, требует неукоснительного соблюдения следующих принципов

- разделение потоков сточных вод разного характера
 - загрязненные/незагрязненные ливневые воды,
 - загрязненные/незагрязненные охлаждающие воды,

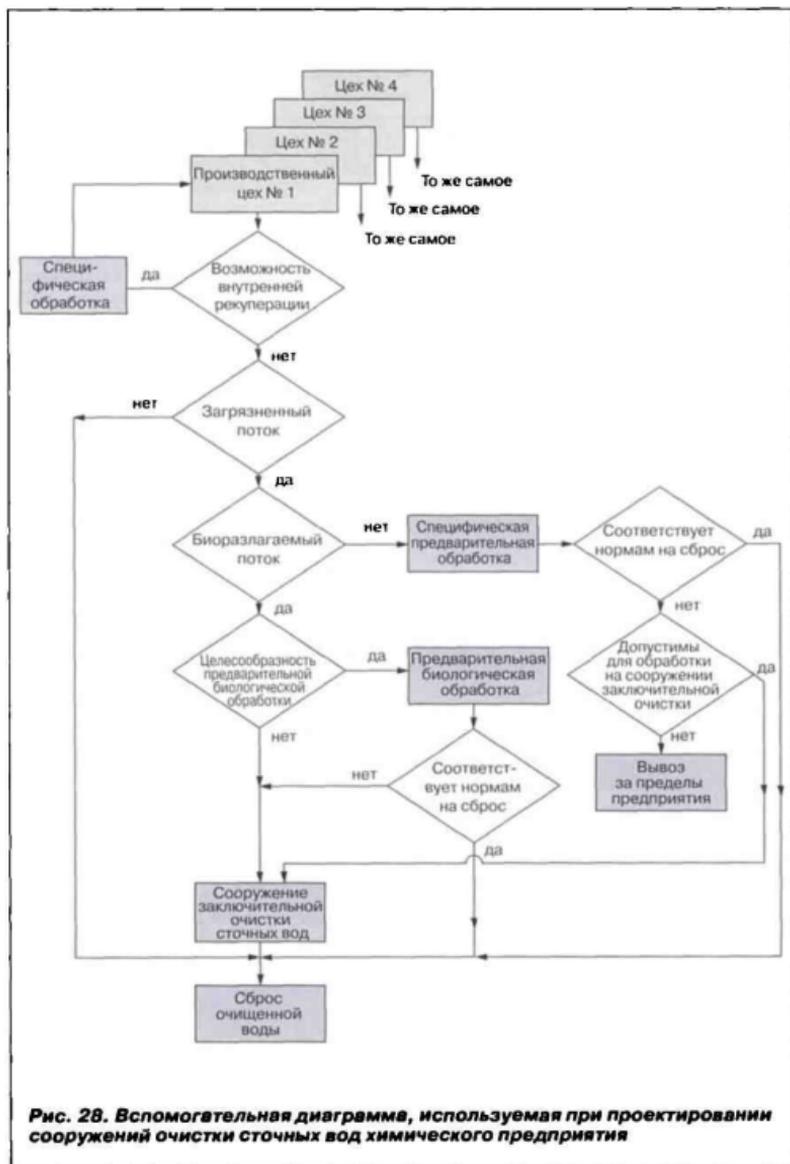


Рис. 28. Вспомогательная диаграмма, используемая при проектировании сооружений очистки сточных вод химического предприятия

- санитарно-бытовые сточные воды,
 - воды, содержащие неорганические загрязнения, допускающие непосредственный сброс,
 - технологические (производственные) сточные воды в соответствии с их происхождением,
 - опасные сточные воды,
- разработка (после упомянутого выше разделения потоков) картограммы потоков различных сточных вод в целях:
- недопущения смешения несовместимых продуктов;
 - обеспечения специфической обработки бионеразлагаемых загрязнений,
 - обработки сточных вод на месте их формирования, а именно
 - в целях их внутренней рециркуляции,
 - для удаления из них загрязнений, мешающих стадии общей заключительной очистки, с помощью специфической обработки (сжигание, адсорбция),
 - для отдельной обработки более концентрированных потоков, что позволит повысить экономическую эффективность стадии общей заключительной очистки,
 - отдельная биологическая обработка некоторых легкобиоразлагаемых концентрированных потоков (метанизация, **Ultraror** и т. п.), что облегчает биологическую обработку на заключительной стадии очистки.

В результате осуществления внутренней рециркуляции или специфической первичной обработки некоторых потоков сточных вод, а также предварительной обработки концентрированных потоков на долю сооружений заключительной очистки остается обработка меньших объемов сточных вод при существенно более низких нагрузках по загрязнениям.

Этапы разработки проекта в рамках такого подхода проиллюстрированы схемой, показанной на рис. 28

6.2. Внутренняя, или специфическая предварительная, обработка

В табл. 11 перечислены некоторые технологии, которые можно использовать для обработки сточных вод предприятий химической промышленности в зависимости от типа загрязнений, требующих удаления

Таблица 11

Технология	Тяжелые металлы	ХПК бионеразлагаемые	АОХ	Углеводороды	NH ₃	Фенолы	Анионы и катионы	ВВ	БПК	Примечание
Остаивание или флотация или фильтрование		х		х				х		После коагуляции флокуляции
Химическое осаждение	х						х			
Микрофильтрация или ультрафильтрация								х		Концентрированные загрязнения в концентрате

Таблица 11 (окончание)

Технология	Тяжелые металлы	ХПК бионеразлагаемая	АОХ	Углеводороды	NH ₂	Фенолы	Анионы и катионы	ВВ	БПК	Примечание
Нанотрифильтрация или обратный осмос	x	x	x				x			Концентрирование загрязнений в концентрате
Окисление (O ₃ , способ Тоссаи)		x	x			x				
Жидкофазное окисление ¹		x	x			x				
Адсорбция		x	x			x				
Ионный обмен	x				x		x			Концентрирование загрязнений в элюатах
Отдувка			x		x					Перенос загрязнений в газовую фазу
Выпаривание ¹	x	x								Концентрирование загрязнений в рассоле от выпаривания
Сжигание ¹		x	x	x	x	x				Качество дымов
Анаэробная биологическая обработка						x		x		При достаточной концентрации стоков
Аэробная биологическая обработка или способ Ultrafor					x	x			x	

¹ Технологии применимы только в отношении высококонцентрированных сточных вод (содержание загрязнений 100 г/л)
 Примечание 1. Токсичные вещества в зависимости от их природы удаляют с помощью одной из указанных технологий
 Примечание 2. Применение технологий порождает формирование специфических отходов (см. столбец «Примечание») способ обработки и оптимальный режим вывоза которых необходимо рассматривать отдельно в каждом конкретном случае

6.3. Сооружения заключительной обработки сточных вод

Проект сооружений заключительной обработки сточных вод предприятия химической промышленности (рис. 29) должен отвечать следующим требованиям.

- должны быть заложены возможности развития с учетом прогнозируемых изменений процессов производства;
- должен предусматривать максимально возможную полифункциональность сооружений по тем же причинам;
- следует предусматривать устройство усреднителей и аварийного резервуара больших объемов;
- необходимые контрольно-измерительные приборы (анализаторы, датчики, токсикометры и т. п.) должны быть размещены таким образом, чтобы предотвра-



Рис. 29. Общая схема сооружений заключительной обработки сточных вод

титель вероятность любого аварийного сброса, недопустимого для подобного рода очистных сооружений и для окружающей среды.

— в идеале должен предусматривать средства контроля потоков загрязнений на выходе из каждого цеха в целях повышения ответственности операторов производственных процессов

Примечания

1 Усреднитель может быть разделен на камеры, которые могут работать в периодическом режиме.

2 Физико-химическая обработка не является обязательной, но она может оказаться необходимой в случае присутствия ВВ, осаждаемых металлов, масел и т. п.

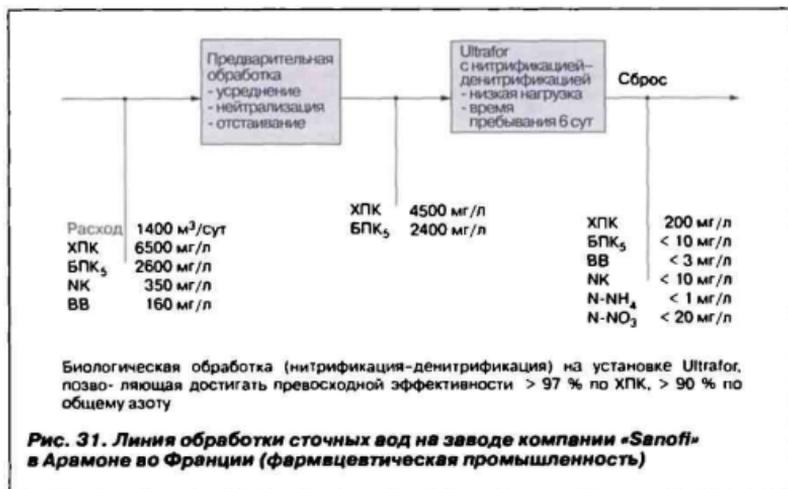
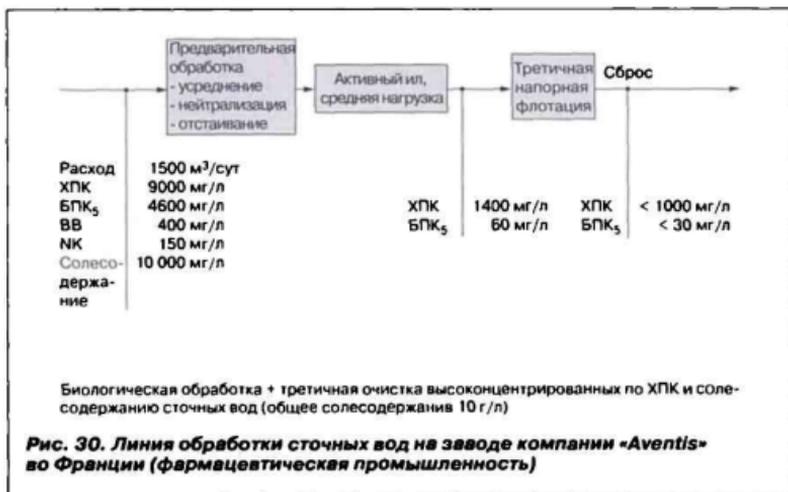
3 Необходимость третичной очистки тесно связана с действующими нормами на сбросы, поэтому можно использовать любые технологии, описанные в п 1 6

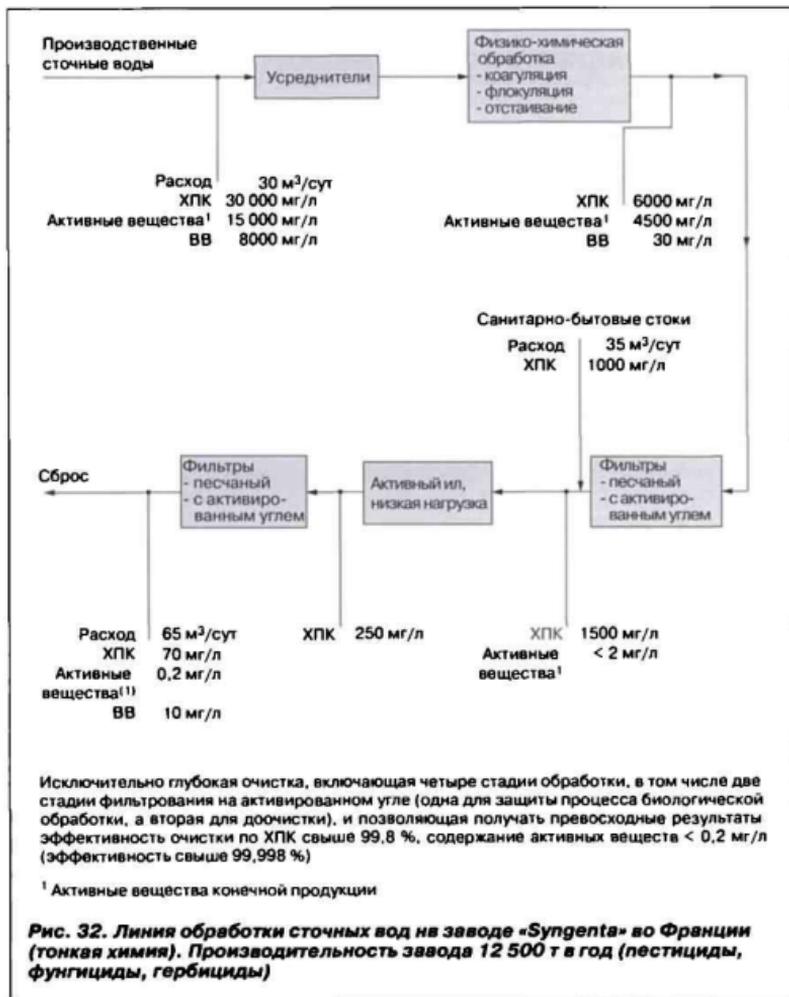
4 Обработка осадков, образующихся на этих очистных сооружениях, должна включать, как правило, следующие процессы
сгущение, обезвоживание,
сушка и/или сжигание

Вследствие специфичности компонентов осадка, что в общем случае не позволяет утилизировать его в сельском хозяйстве, особый интерес представляет применение технологии **Biolysis** (см гл. 11), поскольку стоимость обработки и вывоза осадка все чаще составляет наибольшую долю эксплуатационных затрат предприятий химической промышленности

6.4. Примеры

На рис. 30–32 приведены три типичные линии обработки сточных вод и получаемые результаты (к ним можно также присоединить пример предприятия «Shell-Chimie», приведенный в п. 4 3).





7. Текстильная промышленность

Из всех производств предприятий текстильной промышленности мы выделим деятельность, связанную с **отделкой** текстильной продукции — именно этот вид обработки является наиболее типичным для данной отрасли и чаще всего повторяется на различных производствах, несмотря на все многообразие используемых исходных материалов (широкая гамма красителей, вспомогательных продуктов, используемых волокон и т. п.)

В большинстве случаев технологическая линия обработки сточных вод на предприятиях текстильной промышленности включает стадии, описываемые ниже

7.1. Предварительная обработка

Как правило, предварительная обработка сточных вод на предприятиях текстильной промышленности предусматривает:

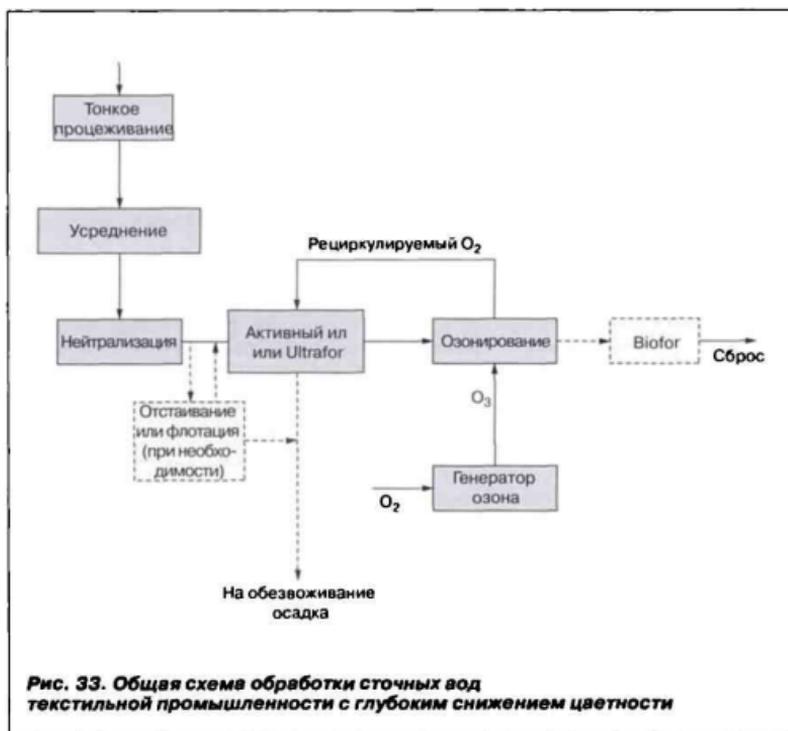


Рис. 33. Общая схема обработки сточных вод текстильной промышленности с глубоким снижением цветности

- тонкое процеживание для удаления волокон (пуха, очесов и т. п.);
- усреднение в специальном резервуаре, роль которого состоит
 - в регулировании расхода, величина которого может меняться в очень широких пределах,
 - в сглаживании значительных колебаний величины рН,
 - в предварительном азрировании сточных вод и окислении сульфидов,
- заключительную нейтрализацию.

Примечание В некоторых случаях может потребоваться первичное разделение загрязнений (отстаивание или флотация).

7.2. Биологическая обработка

В большинстве случаев для максимального удаления биоразлагаемой части ХПК применяется биологическая обработка активным илом при невысокой нагрузке.

Если отношение ХПК/БПК в исходной сточной воде составляет 2–4, эффективность удаления ХПК не превышает 70–90 %, что часто оказывается недостаточным и приводит к необходимости третичной очистки

В тех случаях, когда сточные воды имеют высокую исходную концентрацию по ХПК (≥ 2 г/л), весьма эффективным является применение мембранного биореактора **Ultrafor**

7.3. Третичная очистка

Конечная цель третичной очистки главным образом состоит в следующем

- снижение цветности;
 - снижение биоразлагаемой части ХПК и содержания ВВ
- Наиболее часто для этого применяются.
- обработка коагуляцией-флокуляцией, которая, однако, влечет за собой дополнительные затраты на приобретение реагентов и сопровождается образованием дополнительного количества осадка;
 - отдельное озонирование или озонирование с последующей обработкой на биофильтре **Biofor**, что дает ряд преимуществ
 - компактность оборудования;
 - повышенная эффективность очистки,
 - формирование небольших количеств осадка или полное его отсутствие;
 - при производстве озона из чистого кислорода — улавливание и использование в азротенке избыточного кислорода, что позволяет снизить потребление электроэнергии, связанное с азрированием

7.4. Обработка осадков — удаление запахов

Поскольку формирующиеся осадки имеют преимущественно биологическую природу, для обработки можно применять традиционные технологии. Отметим, что содержание тяжелых металлов в красителях, используемых в текстильной промышленности, неуклонно снижается, и на сегодняшний день эти осадки могут даже утилизироваться в сельском хозяйстве.

При обработке осадков, образующихся в ходе очистки сточных вод текстильной промышленности, не возникает каких-либо специфических проблем, связанных с запахом

7.5. Пример: очистные сооружения ассоциации текстильных предприятий в регионе Haute Vallée de La Touye во Франции

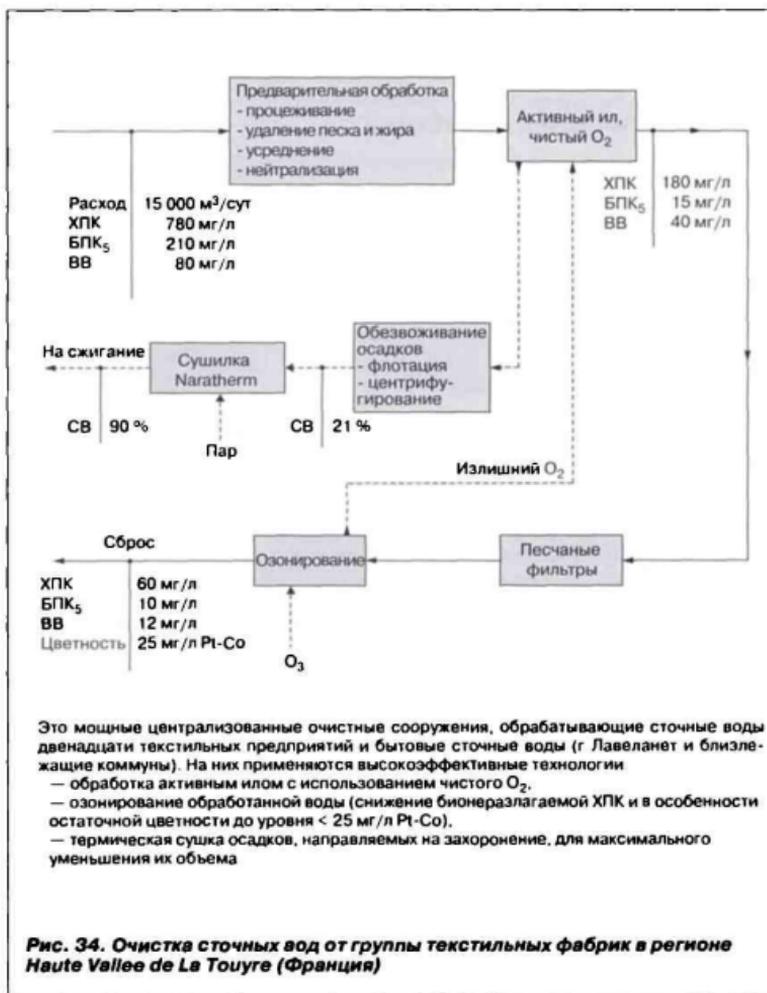




Фото 5. Очистные сооружения ассоциации в регионе Haute Vallée de La Touyrie в г. Лавланете (Арьеж, Франция). Производительность 15 000 м³/ч

8. Черная металлургия

В состав комбината черной металлургии входят следующие производства

— агломерационная фабрика: подготовка руды и шихты для доменных печей — сырьевых материалов для производства чугуна (практически без сточных вод).

— коксохимический завод: производство металлургического кокса, предназначенного для восстановления руды.

— доменные печи: выработка чугуна.

— сталелитейный цех: производство стали различных сортов (в зависимости от добавляемых присадок).

— цех по производству электростали: производство специальной стали и переработка металлолома.

— цех непрерывной разливки стали: формирование слябов, блюмов, болванок, являющихся заготовками для выработки конечной продукции.

— цех горячей прокатки: производство листа, бруса, проволоки и т. п.

— цех холодной прокатки: производство готовой продукции (тонкий лист различных сортов, сталь торгового качества и т. п.)

В комплексе этих производств организована разделная система водоотведения ПСВ, включающая

— полузакрытые системы мокрой очистки газов или орошения вальцов стана горячей прокатки и установки для обработки соответствующих сливов этих систем перед сбросом (обычно такие сточные воды мало загрязнены),

— установки для обработки специфических сточных вод, образующихся на коксохимическом производстве и в цехе холодной прокатки: травление, прокатка и окончательная обработка готовой продукции (эти потоки сильно загряз-

8.1. Полуоткрытые системы

8.1.1. Коксохимическая фабрика

В составе коксохимической фабрики имеются:

— система обеспыливания при тушении кокса, оборудованная прямоугольными отстойниками со скребками; верхний слой осветленной жидкости частично рециркулируется. Следует отметить, что:

- при тушении кокса испаряется 50 % воды;
- существуют жесткие требования по содержанию солей в используемой воде

ограничение концентрации различных солей и, в частности, хлоридов,
 — система обеспыливания на загрузке печей и/или мокрой очистки газов, образующихся при предварительном нагреве угля, оснащенная отстойником, верхний слой жидкости из которого частично возвращают в систему подпитки контура паротушения

8.1.2. Доменные печи

На предприятиях по производству чугуна преимущественно используют систему мокрой очистки газов.

В большинстве случаев сначала производится сухая очистка газов в целях удаления частиц размером свыше 75 мкм, за которой следует мокрая очистка для задер-



жания оставшихся загрязнений (примерно 3 г/л). Основной стадией возможной линии обработки сточных вод (рис. 35) является отделение твердых частиц в сгустителях с коррекцией (при необходимости) жесткости путем частичной декарбонатации известью, после охлаждения верхний слой жидкости направляют на установки мокрой очистки газов.

При обработке сточных вод от производства чугуна иногда возникают проблемы пенообразования, с которыми легко справляются с помощью пеногасителей.

Иногда осадок подвергают обработке в циклоне, чтобы отделить цинк от железа. Полученный осадок с содержанием СВ около 80 % возвращают на участок агломерации (цинк является вредной примесью для доменных печей, поскольку он испаряется в горячей зоне и конденсируется на колошниках печи, приводя к серьезным повреждениям). Перелив из циклонов направляют в специальный сгуститель, причем отстаивающуюся жидкость возвращают в систему мокрой очистки газов, а осадок, содержащий цинк, обезвоживают и складывают. Такая схема обработки осадков обеспечивает удаление 90 % цинка и возвращение в цикл 60 % твердых продуктов. Сливы из установок системы мокрой очистки газов иногда могут содержать цианиды, которые следует окислять перед направлением сточных вод на сооружения общей обработки.

8.1.3. Цех конвертерной стали

В цехах конвертерной стали преимущественно устанавливают системы мокрой очистки газов.

На схеме, приведенной на рис. 36, указаны основные возможные процессы обработки образующихся сточных вод.

- предварительное отстаивание с удалением осадка с помощью шнека или «вибросита»;
- отстаивание в сгустителе (после флокуляции, необходимой в большинстве случаев),

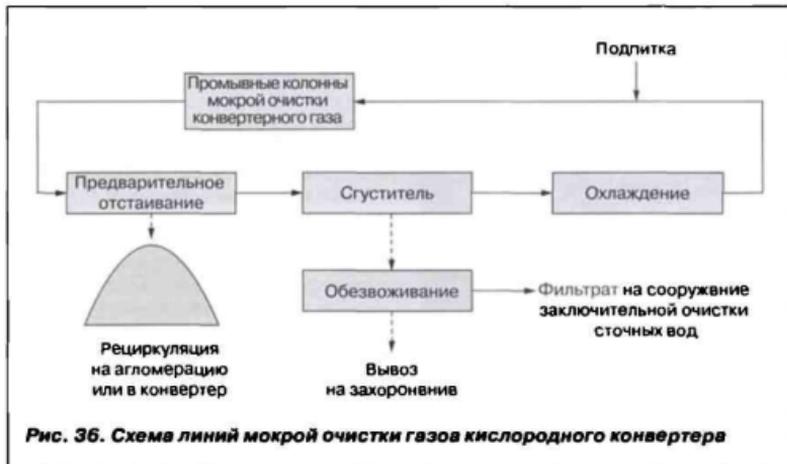


Рис. 36. Схема линий мокрой очистки газов кислородного конвертера

— корректировка щелочности путем добавления Na_2CO_3 (на входе в отстойник)
 Воду, обработанную таким образом, охлаждают и возвращают на колонны промывки газов; осадок из отстойника возвращают в конвертер (эти осадки содержат значительное количество извести, магнезии и карбоната кальция), осадок из сгустителя обезвоживают и вывозят на захоронение. В настоящее время проводятся исследования по изучению возможности возврата осадков из сгустителя на агломерационную фабрику или непосредственно в конвертер (при этом требуется контроль концентрации различных компонентов)

8.1.4. Непрерывная разливка и горячая прокатка

Цехи непрерывной разливки и горячей прокатки (например, см. фото 6) оснащаются замкнутыми системами охлаждения изложниц и печей с соответствующей контрольно-измерительной аппаратурой, функционирующими в условиях кондиционирования и не производящими сточных вод, требующих обработки. Вместе с тем в них есть также системы орошения и охлаждения, сточные воды которых подвергают обработке и направляют на повторное использование, при этом основными загрязнителями воды являются масла, жироподобные вещества и окалина.

Общая технологическая линия наиболее употребительной системы обработки сточных вод для комплекса цехов непрерывной разливки и горячей прокатки включает

— цилиндрический отделитель окалины с тангенциальным вводом воды (обычно называемый гидроциклоном), удерживающий наиболее крупнозернистые частицы ($> 200\text{--}250$ мкм), а также часть масел, поступающих из систем смазки и прокатки. Поток с маслами затем направляют в поверхностные маслоловушки плавающего типа («Nenuphar», «Diskoil», «Liftoil» и др.), тогда как окалину извлекают с помощью грейфера и возвращают в производственный цикл,

— прямоугольный отстойник (только для цеха горячей прокатки) типа API с донными скребками и поверхностными сгонными устройствами; он позволяет удалять мелкую окалину и масло, которое извлекается в поверхностных устройствах вывода масел.

Окалину извлекают черпаком и помещают на площадке естественного обезвоживания, после чего ее возвращают в производство (в зависимости от количества оставшегося в окалине масла):

— группу песчаных фильтров, осуществляющих весьма эффективное удаление масел и мелкой окалины. Воду от промывки этих фильтров подвергают отстаиванию, а затем совместно с фильтратом возвращают в систему орошения после охлаждения в градирне.

Следует отметить, что сточные воды от разливки и прокатки различаются по концентрации масел и крупности частиц окалины.

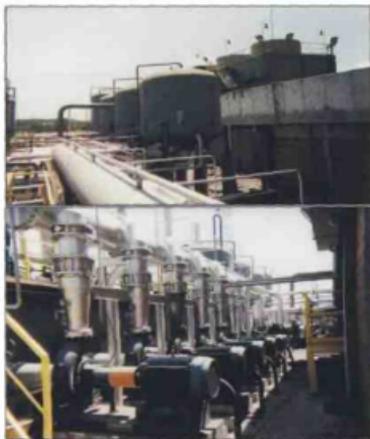


Фото 6. Цех горячей прокатки на металлургическом заводе «Gerdau» в Акос Финосе (Бразилия). Расход воды 48 000 м³/ч



Особое внимание необходимо также уделять системам рекуперации на участках кислородной резки в конце технологической линии разливки стали (ввиду периодически возникающих проблем закупоривания систем сбора отходов). Эти системы опорожняют относительно редко, причем сливаемая вода не требует специальной обработки перед направлением на станцию очистки общего потока сточных вод.

На рис. 37 показана общая схема обработки сточных вод цехов непрерывной разливки и горячей прокатки.

8.2. Поток специфических сточных вод

8.2.1. Аммиачные воды коксохимического производства

Наиболее широко применяемая линия обработки аммиачных сточных вод коксохимического производства включает следующие стадии

- глубокое удаление смолы и дегтя путем отстаивания и фильтрования после введения органического коагулянта,
 - отдувка паром летучих соединений аммония и — после корректировки величины рН каустической содой — удаление фиксированного аммония (часто производится в две ступени на одной колонне),
 - биологическая обработка активным илом для удаления БПК, фенолов, сульфацианидов. При условии соблюдения некоторых предосторожностей, выявленных в предварительных тестах (при отсутствии ингибитора), возможна обработка путем нитрификации-денитрификации,
 - третичная физико-химическая очистка (по мере надобности) для снижения остаточной части ХПК, присутствующей в виде коллоидных частиц.
- Необходимо отметить, что отдувка может также обеспечить снижение концентрации свободного аммония в закрытой системе мокрой очистки газов.

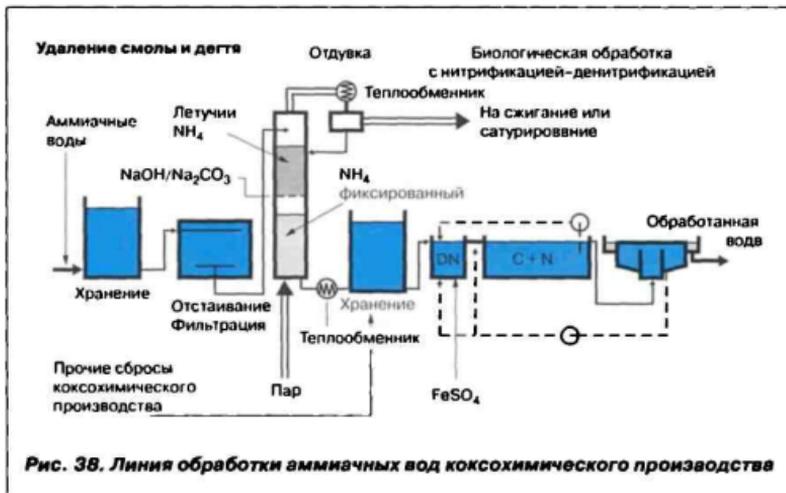


Рис. 38. Линия обработки аммиачных вод коксохимического производства

На рис. 38 показана типовая линия обработки аммиачных вод со стадией глубокой очистки от азота

8.2.2. Сточные воды цеха холодной прокатки

Цех холодной прокатки, в котором из рулонной стали, получаемой в цехе горячей прокатки, изготавливают тонкий лист для автомобильной и строительной промышленности, жёсть для консервных банок, листовую металл для электробытовой техники и т. п., состоит обычно из участков:

- травления (чаще всего соляной кислотой),
- холодной прокатки;
- заключительной обработки (электроцинкования, нанесения органических и гальванопокрытий)

Основными загрязнителями сточных вод цеха холодной прокатки являются травильные кислоты, растворенные металлы, смазочные масла, сильнощелочные обезжиривающие составы. Потоки этих сточных вод следует разделять на месте их образования, обеспечивая в случае необходимости их предварительную специфическую обработку.

При обработке сточных вод цеха холодной прокатки, как правило, осуществляют следующие процессы.

- извлечение отработанной соляной кислоты для ее регенерации методом прокаливания и возврата в технологический процесс,
- извлечение тех концентрированных эмульсий стана холодной прокатки, которые могут быть очищены выпариванием или химическим разрушением (в зависимости от природы эмульсий) или утилизированы за пределами предприятия (например, на цементном заводе). Остаток от выпаривания может сжигаться, а конденсаты направляют на сооружения заключительной очистки общего потока сточных вод на установке флотации щелочных стоков;
- рекуперация отработанных обезжиривающих растворов для хранения и последующего разбавления ими с малым расходом промывных сточных вод;

Такая технология позволяет значительно экономить воду: суммарное потребление воды (если остановиться на стадии нейтрализации–отстаивания включительно) снижается с 1,6 до 0,5 м³/т. Сбросами этой технологической линии являются лишь концентрат обратного осмоса (с исключительно высоким содержанием солей, но слабым загрязнением) и осадки, формирующиеся на различных стадиях обработки, причем некоторые из них горючи и могут сжигаться.

9. Цветная металлургия и гидрометаллургия

9.1. Производство алюминия

9.1.1. Производство глинозема

При производстве глинозема (оксид алюминия) путем выщелачивания бокситов (процесс Байера) образуются растворы алюмината натрия, содержащие суспензию примесей, извлеченных из руды. Эти растворы отстаивают в сгустителях, оснащенных скребковым механизмом, донный осадок (красный шлам) подвергают последовательной противоточной промывке осветленной водой в нескольких промывателях, обезвоживание истощенного осадка осуществляется на ленточных фильтрах под вакуумом (рис. 40).

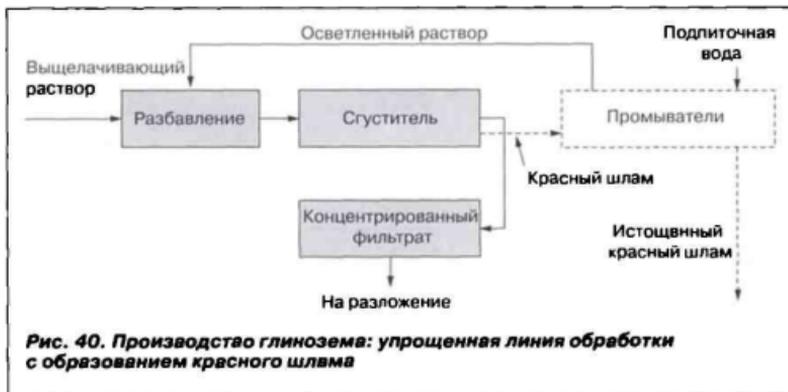


Рис. 40. Производство глинозема: упрощенная линия обработки с образованием красного шлама

Однако, поскольку осадок остается сильнощелочным (от 1,5 до 6 кг каустической соды на 1 т готового глинозема), его обычно подают в лагуну, расположенную на территории завода, верхний слой воды из которой возвращают в производственный процесс.

В результате единственными жидкими отходами производства глинозема являются

- охлаждающие и ливневые воды, последние могут быть загрязнены ВВ (не более 0,03 кг на 1 т глинозема) или растворенным фтором (не более 0,02 кг на 1 т глинозема). Для удаления фтора потребуются дополнительная обработка ливневых вод известью и/или CaCl₂ для осаждения фторида кальция;

— конденсаты, в большей или меньшей степени загрязненные летучими ОВ (см также п 5 2, табл 9 и 10, электростанция «Gregory»)

9.1.2. Фторсодержащие сточные воды, образующиеся при электролизе глинозема

Газы, выделяющиеся в электролизерах, загрязнены CO , HF , SO_2 , парами металлов, пылью и ароматическими полициклическими углеводородами. Поэтому электролитические ячейки закрывают крышками, а очистку газов выполняют сухим способом на оксиде алюминия.

Вместе с тем производится мокрая очистка газа водой после его отвода из-под крышки. Вторичный контур отводит около 10 % воды общего потока и направляет ее на дефторирование известью и отстаивание в установке **Densadeg**.

9.1.3. Сточные воды от производства предварительно спекаемых анодов

На производствах, создаваемых по современным проектам, сточные воды образуются только от систем охлаждения, отводимые газы очищают с помощью рукавных фильтров и/или электростатическим осаждением.

На существующих заводах еще применяется очистка газов мокрым способом. В таких случаях следует предусматривать удаление смолы и дегтя флотацией с кондиционированием органическими коагулянтами и последующим удалением фтора путем осаждения CaF_2 известью и/или CaCl_2 и отстаиванием, например, в установке **Densadeg**.

Необходимо отметить, что катодные рамки и другие сопутствующие элементы (проводники, огнеупоры и т. д.) после отделения подлежат повторному использованию в ходе пирометаллургической обработки.

Электролитический аффинаж алюминия не порождает каких-либо сточных вод.

9.1.4. Производство алюминия из вторичного сырья

Алюминиевые фабрики, перерабатывающие вторичное сырье (банки, отходы экструзии и разливки, рекуперированный алюминиевый профиль и даже крупные частицы производственной пыли), оснащены плавильными печами, вырабатываемый алюминий направляют на установки непрерывной разливки или производства слитков.

В состав сточных вод этих цехов входят охлаждающие воды, которые чаще всего возвращают в производство, ливневые воды, часто загрязненные сырьевыми материалами в результате просачивания на площадках складирования, сточные воды установки непрерывной разливки, содержащие эмульсии, подлежащие разрушению (см п. 10), после которого они могут быть присоединены к ливневым водам для дальнейшего извлечения масел и осветления. На рис. 41 показаны различные стадии производства алюминия и необходимые процессы обработки образующихся сточных вод.

9.1.5. Разливка и горячая прокатка алюминия

Сточные воды от процессов разливки и горячей прокатки алюминия обогащены маслами, пылью и различными материалами, подлежащими удалению. Вода, используемая для питания, должна быть умягченной или слабоминерализованной, и значение pH следует удерживать в пределах, соответствующих минимальной кор-



розии. Перед возвращением в производственный процесс воду необходимо подвергнуть обработке для удаления масла и ВВ.

Поскольку при горячей прокатке сточные воды, как правило, представлены истинными эмульсиями, сливы контура сточных вод следует подвергать обработке, обеспечивающей ее разрушение (см., например, гл. 3, п. 1.4)

На рис. 42 показана схема традиционной организации системы обработки сточных вод цеха разливки алюминия



9.2. Производство цинка и свинца

9.2.1. Сточные воды участка обжига «цинковой обманки»

Более 80 % мирового производства цинка осуществляется гидрометаллургическими методами

Сульфидную, оксидную, карбонатную и силикатную руду после обжига растворяют в серной кислоте, и рафинирование полученных растворов производят с помощью электролиза

После извлечения (в случае необходимости) селена, ртути и в особенности кадмия сточные воды от участка обжига «цинковой обманки» направляют на двухступенчатую нейтрализацию известью на установке, на которую поступают также кислые растворы и воды от гидроскрubberов. В этом случае для обеспечения осаждения фторидов и сульфатов кальция необходимо осуществить отстаивание сточных вод с рециркуляцией осадка. Верхний слой отстаившейся жидкости направляют в линию обработки общего потока сточных вод предприятия.

Следует также упомянуть о том, что существует и пирометаллургическая технология производства цинка, при которой вода потребляется только для охлаждения.

9.2.2. Общий поток сточных вод

На заводах производства цинка, где процесс производства базируется на кислотном выщелачивании, основная доля сточных вод подвергается предварительной обработке непосредственно в цехах. Отводимые общие сточные воды имеют невы-



Фото 7. Общий вид двух установок Densadeg на предприятии «Metaleurop» в Нойель-Годо (Па-де-Кале, Франция). Очистка сточных вод, загрязненных Pb, Zn и Cd. Производительность 2000 м³/ч

сокую концентрацию загрязнений, однако их расход обычно довольно значителен. Для обработки общего потока применяют нейтрализацию и одностадийное отстаивание на установках **Densadeg** (фото 7), что обеспечивает повышенную эффективность удаления тяжелых металлов (типичное содержание загрязнений на выходе отстойника **Densadeg** $Pb < 0,2$ мг/л, $Zn < 0,5$ мг/л, $Cd < 0,25$ мг/л).

Вполне возможно повторное использование таких сточных вод без дополнительной обработки для различных операций промывки, а также в процессах, допускающих применение воды с относительно высоким солесодержанием, для более полной рециркуляции следует производить обработку с помощью мембранных технологий.

9.2.3. Производство свинца

Производство свинца также может осуществляться двумя методами. пирометаллургическим, потребляющим небольшие количества воды и требующим мокрой очистки газов, содержащих SO_2 , или гидрометаллургическим, состоящим в выщелачивании сульфидной руды (PbS) с последующим аффинажем методом электролиза.

Кислые воды, сливы гидроскрubberов и сточные воды, образующиеся при щелочном дехлорировании, подвергают отстаиванию без дополнительной обработки, причем осадок возвращают на этап обжига, а верхний слой осветленной жидкости направляют в систему очистки общего потока сточных вод предприятия.

9.2.4. Производство свинца путем переработки использованных автомобильных аккумуляторов

Получаемый таким образом свинец составляет значительную часть общего производства этого металла.

Средний состав автомобильного аккумулятора (в процентах) приведен в табл. 12.

Из аккумуляторов сливают кислоту, после чего их разрушают и сортируют полученные фрагменты. Свинец проходит обработку в ходе различных процессов, затем его расплавляют и рафинируют.

При этом образуются следующие сточные воды.

- сильноокислые, содержащие значительное количество сульфатов; они образуются на участке слива аккумуляторов и при мытье полов,
- сильнощелочные; они формируются в незначительном объеме при обсушивании свинцовой пасты перед ее направлением на участок извлечения

свинца и имеют высокое загрязнение по сульфатам и ХПК.

Указанные виды сточных вод обрабатывают путем нейтрализации известью с рециркуляцией осадка, позволяющей осаждать сульфат кальция, после чего подвергают отстаиванию в традиционных отстойниках или на установках **Densadeg** (в за-

Таблица 12

Средний состав автомобильного аккумулятора, %

Свинец	25–30
Электродная паста (мелкие фракции оксида свинца)	35–45
Серная кислота	10–15
Полипропилен	4–8
Различные другие пластики	2–7
Эбонит	1–3

висимости от ситуации) Поскольку на предприятии регулярно проводится предварительная нейтрализация сточных вод карбонатом натрия, то для более эффективного осаждения гипса при нейтрализации известью может потребоваться добавление хлорида кальция (см гл. 3, п. 2)

Если сточные воды не содержат слишком большого количества солей, можно рассматривать возможность их повторного использования после очистки обратным осмосом

9.3. Производство меди

На горнодобывающих предприятиях руду обычно предварительно концентрируют флотацией с добавлением химических реагентов, очистка сливов и сбросов цеха также осуществляется непосредственно на месте (см п. 12); **полученные концентраты обрабатывают для извлечения металла одним из двух способов.**

9.3.1. Пирометаллургический способ

При пирометаллургической технологии производства меди потребляется мало воды, в основном вода расходуется на охлаждение, а также для мокрой очистки газов и дымов, содержащих значительное количество SO_2 , которая обычно связана с производством серной кислоты.

При производстве меди руду обжигают, затем металл расплавляют и разливают. Полученные слитки металла устанавливают на аноде электролитической ячейки, в ходе электролиза на катоде выделяется рафинированная медь высокой чистоты (потребление энергии около $250 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ на 1 т Cu). Количество сбросов на этом участке невелико, в основном они образованы анодным шламом, донным осадком и сточными водами от мытья полов.

9.3.2. Гидрометаллургический способ

При использовании гидрометаллургической технологии рудный концентрат подвергают кислотному или кислотно-окислительному выщелачиванию. Раствор рекуперируют либо непосредственно, либо путем каскадной промывки и отстаивания.

Обработку раствора (концентрирование) в большинстве случаев производят селективным осаждением примесей, также ее можно производить методом жидкофазной экстракции. На этой стадии извлекают примеси, направляемые на повторное использование.

Металлическую медь получают методом электролиза с инертным анодом (Pb или Ti) и катодом из чистой меди. Процесс потребляет от 2500 до $3000 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ на 1 т изготовленной меди. Медь осаждается на катоде, а газы, выделяющиеся на аноде (O_2 , Cl_2), селективно улавливают и возвращают в процесс.

В результате получают медь очень высокой чистоты. Для коммерческой реализации ее можно прокатывать (горячей или холодной прокаткой), обрабатывать волочением через фильеры или экструдировать в виде труб.

На предприятиях производства меди по этой технологии осуществляется достаточно разнообразная обработка сточных вод. Она касается

- ливневых вод, собираемых с крыш, мощеных дорожных покрытий и отвалов пустой породы,
- сточных вод от мокрой очистки кислых газов, содержащих большие количества SO_2 ,
- остаточных сильноокислых отходов выщелачивания,
- производственных сточных вод предприятия (гранулирование, различные виды травления, электролизный шлам и т. п.)

Очистка сточных вод может производиться различными способами (рис 43) сточные воды от мокрой очистки газов обрабатывают непосредственно на предприятии с одновременным производством серной кислоты, используемой для выщелачивания. Кислые отходы нейтрализуют известью для осаждения в форме гипса (имеющего определенную коммерческую ценность) и подвергают отстаиванию традиционными методами. Частично очищенные и ливневые сточные воды нейтрализуют известью, к ним также добавляют верхний слой из отстойников обработанных кислот вод. Для извлечения различных тяжелых металлов эту смесь сточных вод вновь подвергают отстаиванию при оптимальном значении pH в отстойниках с уплотнением осадка типа **Densadeg**



Рис. 43. Общая блок-схема обработки сточных вод на предприятии по производству меди

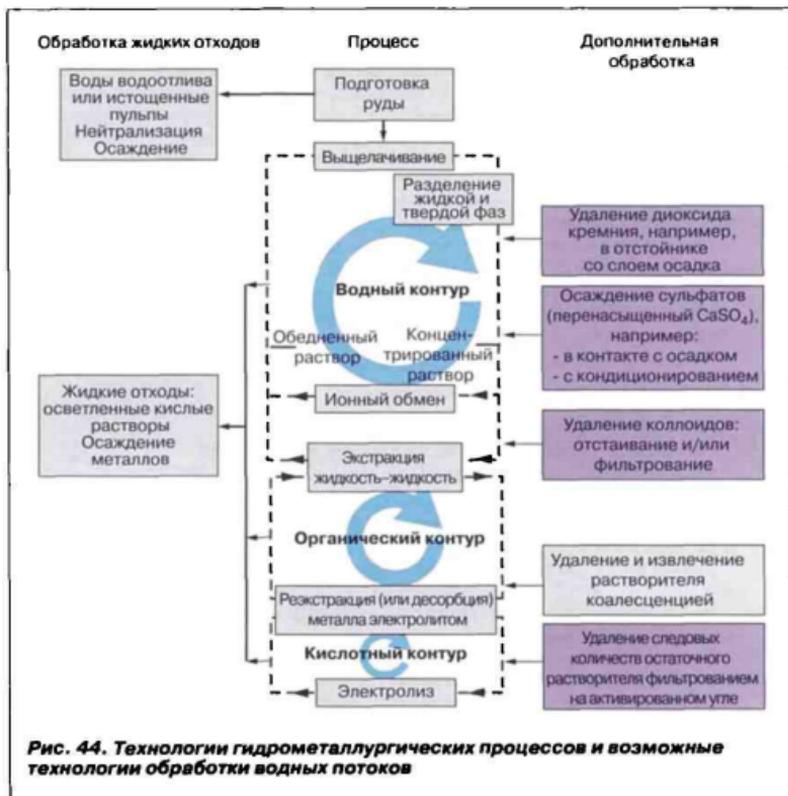
Для удаления ВВ и остаточных количеств металлов может понадобиться заключительное фильтрование с добавкой флокулирующего полимера.

Вполне возможна рециркуляция этих сточных вод (25–30 %) на заводские производства, имеющие отношение к менее благородным элементам; для повышения степени возврата сточных вод в процесс производства можно предусмотреть этап третичной очистки.

9.4. Общие гидрометаллургические технологии производства

Гидрометаллургическими методами могут также обрабатываться руды многих других металлов: урана, золота, серебра и т. д.

На рис. 44 показана схема формирования жидких потоков с выделением отдельных стадий технологий их обработки, которые могут быть реализованы с использо-



ванием рассмотренных ранее технологий компании «Дегремон» (более темные элементы схемы)

10. Обработка поверхностей (обезжиривание и нанесение металлических покрытий)

Нанесение металлических покрытий на поверхности различных материалов (металлических, пластиковых и т. п.) осуществляется в многочисленных цехах (обычно называемых гальваническими), имеющих самую различную мощность и срок эксплуатации. Загрязненные сточные воды образуются

- водами от промывки изделий с нанесенными металлическими покрытиями,
- отработанными металлосодержащими технологическими растворами (ставшими непригодными для их употребления по назначению)

Количество и качество сточных вод от процессов нанесения покрытий зависят от природы рабочих технологических растворов и их концентрации, а также от используемой схемы производственного процесса (например, наличие стадии стекания между обработкой в ванне и промывкой, наличие непроточных ванн промывки и т.п.). Вследствие этого проектированию любой производственной линии обработки поверхностей должно предшествовать тщательное изучение вариантов организации такого производства в целях оптимизации расходов промывной воды и рассмотрения возможности извлечения сырьевых материалов в любом доступном для этого звене технологической цепочки.

При выборе технологической линии обработки сточных вод от процессов нанесения покрытий исходят из двух основных вариантов: обработка в открытой системе (обезвреживание) или обработка в рециркуляционной (оборотной) системе, причем на практике часто наблюдается сосуществование и взаимопроникновение систем обоих типов.

10.1. Рециркуляционная система

10.1.1. Рециркуляция промывных вод после обработки на ионообменных смолах

Обработка промывных вод гальванических цехов на ионообменных смолах, на которых происходит отделение содержащихся в них катионов и анионов, позволяет возвращать эти воды в производственный цикл.

Рис. 45 иллюстрирует принципиальные возможности рециркуляционной системы.

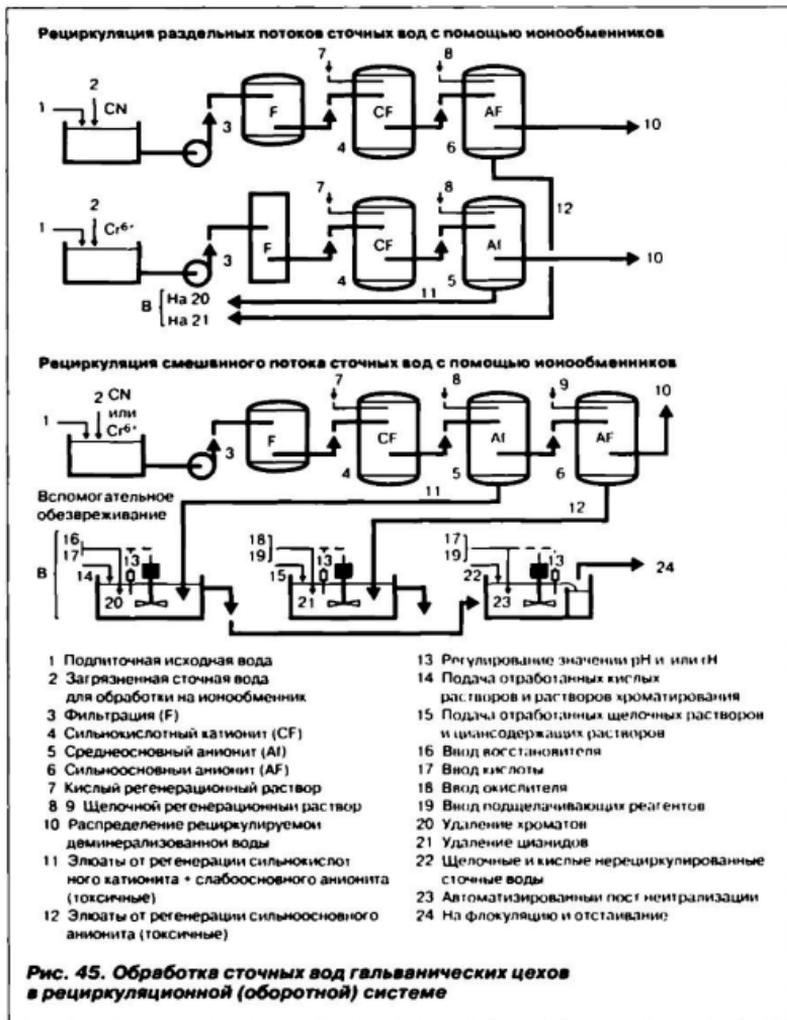
Ионообменные аппараты могут устанавливаться на определенном участке производства с регенерацией ионитов непосредственно на месте — такой подход вполне целесообразен для цехов, имеющих значительную производительность, в противном случае колонны с ионитами могут быть мобильными и направляться на регенерацию в специализированные центры, имеющие соответствующую аккредитацию. Этот подход разумен для установок небольшой мощности (максимальный объем смолы 200 л), при этом он требует постоянного присутствия запасного комплекта колонн с регенерированными ионитами.

Какова бы ни была схема водоснабжения гальванического цеха, рециркуляция сточных вод выполняет двойную роль: она обеспечивает рекуперацию (и повторное использование) воды и концентрирование загрязнений, вследствие чего такая схема требует дополнительного обезвреживания (детоксикации) образующихся отходов.

Рециркуляция сточных вод с применением обработки на ионообменных смолах имеет следующие преимущества:

- значительное снижение потребления свежей воды;
- подготовка воды высокой чистоты при меньших затратах и с повышением качества промывки изделий;
- концентрирование загрязнений (и, следовательно, обработка сточных вод с меньшим расходом на последующих стадиях);
- извлечение некоторых ценных продуктов (золота, серебра, хроматов);
- стабилизация рабочих растворов в ваннах хромирования.

Извлечение благородных или высокотоксичных металлов можно также осуществлять путем **электролиза** вод из непроточных промывных ванн, осуществляемого в непрерывном режиме. Этот способ может быть рекомендован в первую очередь для рекуперации золота, серебра, кадмия, меди, никеля.



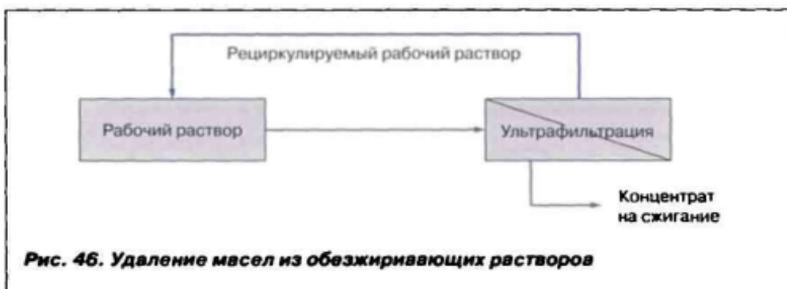
10.1.2. Меры сохранения активности обезжиривающих растворов

Обезжиривающие растворы быстро загрязняются маслами, попадающими в них с поверхности обрабатываемых изделий. При содержании масла, превышающем несколько процентов, качество обезжиривания становится неудовлетворительным и требуется обновление раствора.

Способ **ультрафильтрации** позволяет извлекать свободные масла, увеличивая срок службы раствора, что обуславливает экономию химических реагентов

Ультрафильтрация широко применяется, например, в черной металлургии (крупнейший потребитель средств обезжиривания), на предприятиях холодной прокатки, а также для обработки обезжиривающих растворов перед непрерывным отжигом или перед ваннами для нанесения металлических покрытий, ее используют также и в автомобильной промышленности

Установка одной системы ультрафильтрации (рис. 46) может обеспечить утроение срока службы рабочего раствора



10.2. Обезвреживание (детоксикация)

Обезвреживание токсичных металлов и соединений называют также обработкой в открытом цикле или обработкой с потерей воды.

Не имея возможности рассматривать все схемы подобного типа, отметим, что все они направлены на выполнение некоторого числа элементарных функций (рис. 47), реализуемых с помощью реакций окисления, восстановления, нейтрализации с последующим осаждением гидроксидов металлов и различных токсичных загрязнителей (см также гл 3, пп 1 и 2)

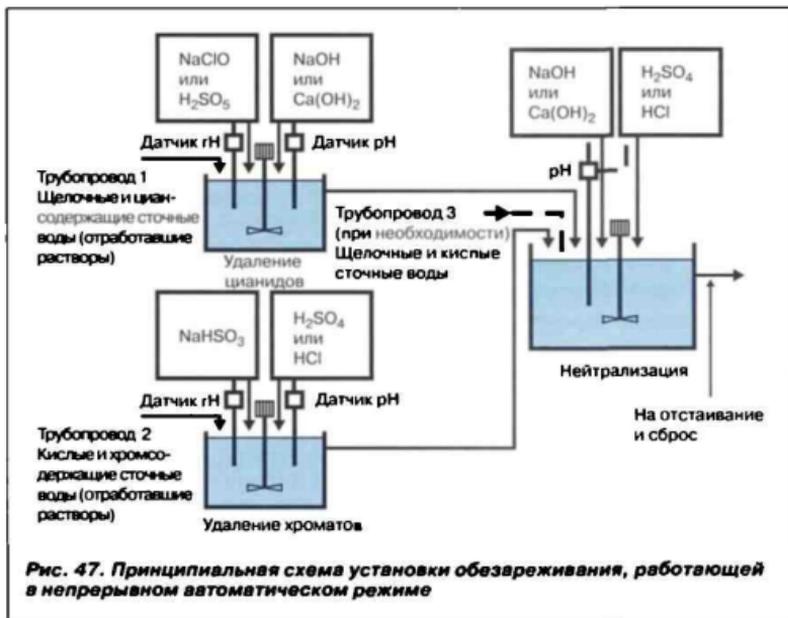
В зависимости от расхода сточных вод и наличия свободного места для размещения оборудования можно рассматривать

- применение установки **Turbactor** — быстрого реактора-смесителя в герметичном корпусе, работающего под давлением, что позволяет уменьшить длительность реакций по сравнению с традиционными системами,
- использование простых статических или тонкослойных статических отстойников (см гл. 10, п. 3 1) для отделения различных взвесей гидроксидов, а также фильтр-прессов для обезвоживания полученных осадков

10.3. Выпаривание

Выпаривание может оказаться полезным в тех случаях, когда речь идет о концентрированных сточных водах, которые трудно (или невозможно) обрабатывать по традиционной технологии. Примерами таких сточных вод могут служить отработанные охлаждающие эмульсии на металлообрабатывающих предприятиях или эмульсионные растворы с участков холодной прокатки.

Выпаривание (рис. 48) позволяет извлекать пастообразный концентрат, который затем направляют на переработку в аккредитованные центры или на совместное



сжигание с отходами, образующийся конденсат может обрабатываться на общих очистных сооружениях, а в некоторых случаях и возвращаться в производственный цикл



10.4. Доочистка сточных вод

Отметим два способа, позволяющих снизить концентрацию металлов в сбрасываемых сточных водах: третичное фильтрование и доочистка на ионообменных смолах.

10.4.1. Третичное фильтрование

После отстаивания может потребоваться дальнейшее снижение содержания тяжелых металлов в сбрасываемых сточных водах, например, путем полного удаления ВВ, которые в большинстве случаев представляют собой гидроксиды металлов. Можно также предварительно снизить содержание растворенных металлов добавлением химического реагента, переводящего их в нерастворимое состояние (органические сульфиды, фосфаты и т.п.). В таких случаях хорошие результаты дает фильтрование на открытых или напорных песчаных фильтрах. Иногда для этого требуется контактная коагуляция на фильтре (контактные осветлители).

10.4.2. Доочистка на ионообменных смолах

Стадию доочистки на ионообменных смолах располагают в той же части технологической линии, что и стадию третичного фильтрования, причем часто она следует за фильтрованием на песчаном фильтре, что предотвращает преждевременное забивание смолы. Доочистка заключается в улавливании ионов растворенных металлов на селективных смолах (как правило, катионитах).

Обычно используют два последовательно установленных ионообменных аппарата: первый из них обеспечивает максимальное концентрирование металлов, тогда как на втором производится доочистка раствора. Элюаты регенерации возвращают на вход в линию обработки сточных вод. В результате такой доочистки получают направляемые на сброс сточные воды, в которых содержание любого металла снижено до нескольких микрограммов на литр.

11. Автомобильная промышленность и металлообработка

В гл. 2, п. 5.9, рассматривались производственные процессы, сопровождающиеся формированием сточных вод в цехах металлообработки, а также на кузовных участках и в сборочном цехе. Кроме того, подобные предприятия и их субподрядчики имеют цехи, выполняющие работы по обработке поверхностей (см. п. 10). Рассмотрим лишь три специфических аспекта проблемы:

- обработка смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ),
- обработка сточных вод линии фосфатирования,
- обработка сточных вод лакокрасочных участков.

11.1. Обработка смазочно-охлаждающих жидкостей

Для большинства металлообрабатывающих операций обработка СОЖ заключается в удалении твердых примесей и тонком фильтровании на непрерывном бумажном фильтре под давлением или под вакуумом.

К СОЖ, используемым при шлифовании, предъявляются более высокие требования по качеству, которое можно обеспечить тонким фильтрованием с использованием фильтрующих патронов или свечей либо (реже) методом флокуляции или напорной флотации.

После всех операций обработки СОЖ масло, всплывающее на поверхность в баках-хранилищах, содержит мелкие металлические частицы, которые можно удалять с помощью барабанных магнитных сепараторов.

11.2. Разрушение СОЖ на водной основе

11.2.1. Эмульсии

Для обработки СОЖ, содержащих углеводороды или иные вещества, не смешивающиеся с водой, можно использовать несколько способов

— химическое **тепловое разрушение** (65–80 °С) в кислой среде (рН = 1–2) с использованием неорганического коагулянта (Al или Fe). После контакта, длительность которого определяют опытным путем, масло всплывает на поверхность и может быть отделено путем естественного отстаивания или центрифугированием. В случае необходимости можно провести доочистку напорной флотацией. В противном случае сточные воды следует направить на сооружения общей обработки сточных вод.

— химическое **холодное разрушение** органическими дезэмульгаторами. Проведение тестов позволяет оценить работоспособность такого процесса и определить необходимое время контакта. Оба способа (тепловое и холодное разрушение) дают сходные результаты, однако при последнем образуется меньшее количество осадка, поэтому холодное разрушение эмульсий (в случае его применимости) часто оказывается экономически более выгодным. На рис. 49 показана технологическая линия, используемая для химического разрушения СОЖ (эмульсий) любым из этих двух способов.

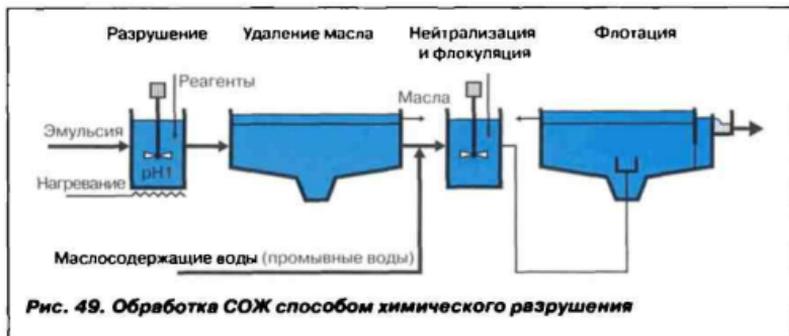


Рис. 49. Обработка СОЖ способом химического разрушения

— **ультрафильтрация**. Этот способ (рис. 50) не требует применения реагентов и позволяет получать чистую воду наилучшего качества. До внедрения ультрафильтрации следует провести пилотные испытания для оценки ее эффективности и опасности забивания мембран. Полученный концентрат, содержащий от 30 до 50 % масел, направляют на сжигание или в аккредитованный центр утилизации.

— **выпаривание**. Этот способ (рис. 51) позволяет получать конденсат, не содержащий ВВ (маслосодержащих или иных), однако в конденсате могут оставаться продукты, имеющие низкую температуру кипения и определяющие величину ХПК, вследствие чего конденсат следует направлять на сооружения заключительной обработки общего потока сточных вод. Пастообразный остаток от выпаривания, содержащий масло (иногда более 80 %) направляют на сжигание. Выпаривание обеспечивает эффективную очистку, однако его можно применять лишь при относительно низких расходах сточных вод (не более 5 м³/ч)

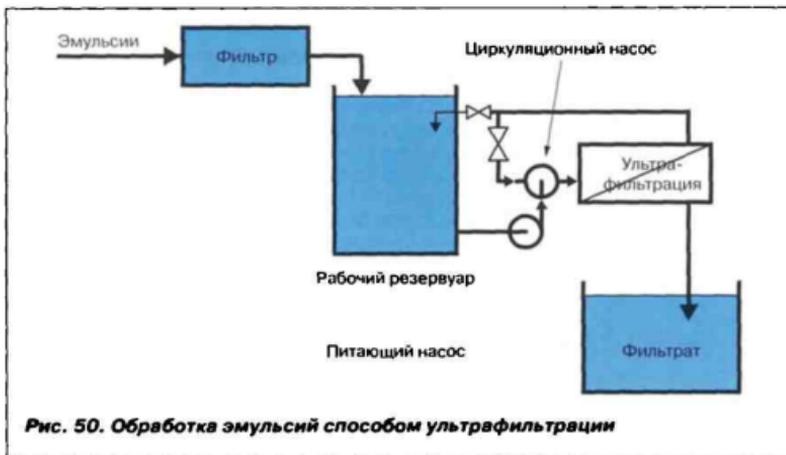


Рис. 50. Обработка эмульсий способом ультрафильтрации



Рис. 51. Обработка отработанных СОЖ на водной основе способом выпаривания

Примечание В любом случае предварительное удаление плавающих масел является обязательным

11.2.2. Полусинтетические СОЖ

Хотя полусинтетические СОЖ содержат меньшее количество углеводородов, все предшествующие положения остаются в силе, отметим, что снижение ХПК в этом случае менее выражено, чем для эмульсий

После обработки следует предусмотреть стадию дополнительной биологической очистки (после разбавления растворов в случае их токсичности)

11.2.3. Синтетические СОЖ

Единственно возможными методами разрушения синтетических СОЖ остаются выпаривание и/или сжигание. Однако лишь ультрафильтрация позволяет удалить все посторонние масла (утечки из системы смазки металлообрабатывающих стан-

ков, масло, привнесенное обрабатываемыми изделиями) и тем самым значительно продлить срок службы СОЖ, снижая частоту их замены

11.3. Фосфатирование

В настоящее время для фосфатирования применяют составы, содержащие Mg, Fe, Zn и PO_4 . Обработку сточных вод от различных промывных операций осуществляют традиционными способами (нейтрализацией, коагуляцией, отстаиванием), причем обработка может производиться после их смешивания со сточными водами других производств, например из цехов обработки поверхности изделий (гальванических цехов)

Хромовую пассивацию, которая следовала за фосфатированием, в настоящее время не применяют. Вместо этого наносят органическое покрытие способом, позволяющим без повреждений сваривать листы металла, несущего такие покрытия. Таким образом устраняется источник образования высокотоксичных сточных вод, содержащих шестивалентный хром

11.4. Окрасочные камеры

11.4.1. Окраска методом катодфореза

Независимо от способа окраски технология ультрафильтрации позволяет извлекать из промывных вод от окрасочных камер смолы и пигменты красителей и возвращать в процесс очищенную воду

В прошлом основную проблему составляло присутствие в промывных водах свинца, который следовало удалять до значения менее 1 мг/л путем осаждения гидроксикарбоната свинца. Отделение осадка производилось напорной флотацией, причем содержание сухого продукта в зависимости от типа краски составляло от 6 до 12 %; после обработки даже хорошо осветленная вода имела значительные загрязнения по ХПК (главным образом, растворители) от 2 до 5 г/л

Новые составы красителей (исключающие свинец и наиболее токсичные растворители) позволяют оптимизировать извлечение загрязнений из промывных вод, а усовершенствование технологии ультрафильтрации (снижение частоты промывки мембран) ограничивает объем сбросов и позволяет направлять их непосредственно на сооружения обработки общего потока сточных вод предприятия

11.4.2. Чистовое лакокрасочное покрытие

В прошлом обработку воды от «водяных завес» лакокрасочных камер производили путем разрушения красящих материалов щелочными продуктами непосредственно в приемке для сбора сточных вод камеры; верхний слой жидкости обрабатывали напорной флотацией после предварительной коагуляции минеральными или органическими реагентами

Флотопродукт, образующийся при флотации, имеет липкую консистенцию при содержании СВ около 6 %; верхний слой воды достаточно прозрачен, но содержит еще загрязнения по ХПК (несколько граммов на литр)

Современные разработки направлены на создание водорастворимых красок и эмалей; растворители остаются необходимыми лишь для разведения лаков. Физико-химическая обработка уступила место биологической, которую осуществляют непосредственно под окрасочными камерами, концентрированный осадок регулярно извлекают и направляют на переработку в специализированные технические

центры захоронения первой категории (СЕТ I, по французской классификации) После извлечения осадка сливы можно направлять на сооружения заключительной обработки совместно с другими сточными водами предприятия

На любом лакокрасочном участке, к какой бы отрасли ни относилось соответствующее предприятие, необходимо следовать базовым принципам, изложенным в п. 1

- сокращение поступления в отводимые сточные воды загрязняющих и токсичных продуктов непосредственно на месте их появления,
- рециркуляция сточных вод везде, где это возможно,
- минимально возможное применение химических реагентов

12. Горнодобывающая промышленность

В горнодобывающей промышленности могут встретиться три типа проблем, связанных со сточными водами

- откачиваемые шахтные воды (отвод кислотных шахтных вод) речь идет об отводе грунтовых и инфильтрационных вод, которые необходимо постоянно откачивать, чтобы не допустить затопления шахты во время ее эксплуатации,
- сточные воды обогащательных цехов и предприятий, расположенных на территории рудника (ПСВ зтапов первичного концентрирования руды и извлечения металлов),
- инфильтрационные воды, затопляющие заброшенную шахту они могут выходить наружу и загрязнять окружающую среду, поэтому после вывода шахты из эксплуатации должен осуществляться соответствующий контроль

Управление охраной окружающей среды вблизи объектов горнодобывающей промышленности повсеместно является стратегическим направлением, причем проблемы, связанные с охраной водных ресурсов, имеют первостепенную важность, поскольку они касаются значительных объемов этого ценного природного продукта Компания «Дегремон» накопила достаточный опыт решения всех трех перечисленных проблем

12.1. Откачиваемые шахтные воды

Поскольку сброс откачиваемых шахтных вод без предварительной очистки может вызвать серьезное загрязнение природной среды, необходимо предусматривать их обработку, технология которой должна определяться в каждом конкретном случае.

В зависимости от мощности рудника объемы откачиваемых вод могут достигать более 100 000 м³/сут

В большинстве случаев речь идет о кислых водах, требующих нейтрализации и удаления металлов, что может вызывать большие или меньшие трудности в зависимости от набора растворенных металлов и пределов допустимого их содержания, устанавливаемых нормами сброса.

Как правило, нейтрализация в установке **Densadeg** позволяет обеспечивать качество обработанных шахтных вод, отвечающее нормам сброса в окружающую среду Часто откачиваемые шахтные воды содержат:

- значительные концентрации сульфатов, что вызывает необходимость их осаждения в виде гипса (сульфат кальция) при нейтрализации известью (см. гл. 3, п. 2.4),
- значительные концентрации двухвалентного железа (от 10 до 500 мг/л), что вызывает необходимость его окисления с последующим осаждением. Отметим, что

часто для окисления вполне достаточно растворенного в воде кислорода, если это позволяют величины pH и окислительно-восстановительного потенциала, — иногда содержание железа может достигать 1–2 г/л, в этом случае значительные количества SO_4 и/или CO_2 позволяют повышать скорость отстаивания благодаря утяжелению хлопьев. В подобных ситуациях, учитывая значительные количества образующегося осадка, при расчете установки **Densadeg** следует рассматривать ее как сгуститель.

Другим способом решения проблемы является глубокая очистка откачиваемых шахтных вод в целях последующего использования для орошения полей, а в засушливых зонах — и в качестве питьевой воды. Качество воды при этом должно соответствовать рекомендациям ВОЗ и местных нормативных документов.



Фото 8. Пилотная установка «Атапчи» (площадка 2) по производству питьевой воды из шахтных вод

Технологическая линия в таких случаях усложняется и включает, например, следующие стадии обработки

- нейтрализация (с последующим осаждением гипса и различных металлов) На этой стадии необходимо обращать внимание на присутствие металлов, вредных для окружающей среды [(марганца, селена, ванадия, кобальта), а также таких радиоактивных элементов, как уран и радий (перечень можно дополнить)] Для защиты мембран установок обратного осмоса следует также контролировать содержание стронция и бария;
- отстаивание в установках **Densadeg** или в традиционных отстойниках в зависимости от концентрации сфлуккулированных веществ,
- фильтрование на песчаных фильтрах (две ступени);
- мембранная обработка (обратный осмос или нанофильтрация),
- реминерализация (по мере необходимости)

Для снижения потерь воды можно также предусмотреть обработку концентратов обратного осмоса. В этом случае уровень рекуперации воды из шахтных вод, поступающих на обработку, достигает 90–95 %

Следует, однако, отметить, что во всех рассмотренных случаях образуются значительные объемы осадка. При осаждении гипса концентрация сухих веществ в осадках может достигать 300 г/л, в присутствии одних только металлов (без осадка гипса) содержание сухих веществ в осадках не превышает 80 г/л.

Эффективное обезвоживание обеспечивает обработка на фильтр-прессе, а возврат фильтрата позволяет рекуперировать воду при необходимости ее повторного использования.

12.2. Сточные воды рудообогатительных предприятий

Ограничимся рассмотрением цехов, расположенных непосредственно на территории горнодобывающего предприятия и не занимающихся обработкой шахтных вод

В данном случае проблемы обработки сточных вод более сложны и требуют внимательного изучения в каждой конкретной ситуации: все зависит от состава добываемой руды и от обработки, которой она подвергается

Большей частью речь идет об удалении тяжелых металлов в сильнокислой среде способами осаждения и отстаивания с получением воды, качество которой соответствует нормам сброса в природную среду или, при необходимости, требованиям для возврата в технологический процесс. Последний случай, в частности, наблюдается на медных, никелевых и урановых рудниках.

В каждой конкретной ситуации следует определить оптимальные условия обработки воды (величину pH и условия осаждения), в особенности если речь идет о специфических загрязнениях окружающей среды (мышьяком, сурьмой, селеном и т. п.) или об особо жестких нормативных требованиях по содержанию металлов в сбросах или по их радиоактивности. В ряде случаев (США) удавалось удовлетворить исключительно жесткие требования на содержание металлов, от 1 до 20 мг/л по Cu, Zn, Pb (и даже до 1–20 мг/л по таким токсичным металлам, как Hg или Ag), что позволило сбрасывать очищенную воду в реки и озера, **имеющие рекреационный статус**

Иногда могут возникать проблемы, связанные с ХПК сточных вод, которая обусловлена различными реагентами, используемыми в производственном процессе и способными выполнять роль ингибиторов осаждения и/или флокуляции.

В большинстве случаев кислотность сточных вод связана с присутствием серной кислоты, что вызывает необходимость осаждения гипса. Добавление значительных

количество требующейся для этого извести увеличивает величину pH раствора до значений, превышающих 10, что позволяет осуществить сопутствующее удаление таких тяжелых металлов, как Mn, U и Ra.

К особо сложным ситуациям можно отнести, например, одновременное присутствие значительных количеств марганца, требующего для своего окисления и осаждения повышенных значений pH, и таких амфотерных металлов, как алюминий, который нерастворим при нейтральных значениях pH и переходит в раствор при значениях pH, оптимальных для удаления марганца. Все сказанное проиллюстрировано на графике на рис. 52, из которого видно, что даже в присутствии железа для эффективного удаления марганца требуется pH > 9, тогда как алюминий следует удалять при pH < 7,5. Для удовлетворения этих требований необходимо двухступенчатое осветление, как, например, на очистных сооружениях «Pinal Creek» (фото 9), где весьма удовлетворительные результаты получены при использовании двух установок **Densadeg** (одной при pH = 6,5, а второй при pH = 9,2), за которыми следуют фильтры **Greenleaf**.



Рис. 52. Кривые зависимости растворимости алюминия и марганца от величины pH шахтных вод

На практике каждая конкретная шахта и каждый конкретный цех требуют специального рассмотрения, исходя из применяемой технологии и действующих требований нормативных документов.

Остановимся на двух примерах рециркуляции сточных вод в цехе аффинажа меди.

■ Простая рециркуляция

Очистная установка осуществляет нейтрализацию кислых сточных вод с осаждением гипса и отстаиванием. Верхний слой осветленной воды направляют на вторую нейтрализацию общего потока технологических сточных вод с осажде-



Фото 9. Общий вид очистных сооружений «Pinal Creek» (США)

ем металлов введением специфического флокулянта перед последующим отстаиванием

Очищенные сточные воды частично возвращают в технологический процесс

■ Рециркуляция с повышением качества воды

Производственные сточные воды направляют в лагуну-накопитель большой емкости, в которой оседает часть гипса, образовавшегося после предварительной нейтрализации известью, выполненной на руднике

После этого сточные воды направляют на очистные сооружения, где вновь нейтрализуют известью для завершения осаждения гипса и металлов (длительность контакта 2 ч), после чего подвергают отстаиванию, причем верхнюю часть осветленной жидкости подвергают двойному фильтрованию на песчаных фильтрах, а затем направляют на установку обратного осмоса

В подобных случаях эффективность технологической линии обработки сточных вод следует предварительно проверять на пилотной установке (т. е. изучать влияние присутствия ингибиторов осаждения на этапе нейтрализации или дозирования антинакипеобразователей на стадии обратного осмоса в целях предотвращения осаждения гипса при его концентрировании на мембранах).

Такая обработка позволяет получать воду превосходного качества, практически не содержащую минеральных примесей, которую можно использовать на любых технологических участках предприятия

12.3. Контроль шахт после их вывода из эксплуатации

После истощения запасов добываемых руд или снижения рентабельности эксплуатации шахты закрывают, оставляя покинутые рудничные территории, пред-

ставляющие определенную опасность для окружающей среды (загрязнение воды, опасность смешения горных пород и грунта, выделение рудничных газов)

Заброшенные шахты, из которых не откачиваются шахтные воды, постепенно заполняются инфильтрационной водой и грунтовыми водами, содержащими различные металлы. Вышедшая из шахты вода, попадая в водоносные слои и поверхностные воды, загрязняет их вынесенными примесями. Типичным источником подобных загрязнений являются сульфидные руды металлов (Fe, Pb, Zn и т. д.). Дело в том, что постепенно под действием бактерий эти руды окисляются с образованием серной кислоты, переводящей соответствующие металлы в растворимое состояние.

В таких случаях приходится очищать воду из загрязненных источников в целях удаления кислоты и металлов (проблема аналогична той, которая решается при обработке кислотных шахтных вод).

Компания «Дегремон» разработала технологическую линию для обработки сточных вод, образующихся на выведенной из эксплуатации шахте, в которой добывались руды Pb, Zn и Ag. Эта линия включала

- окисление кислородом воздуха двухвалентного железа в трехвалентное,
- нейтрализацию и осаждение гидроксидов металлов,
- отстаивание,
- заключительное фильтрование для удаления следов ВВ (гидроксидов металлов)

Результаты очистки вод, образующихся на выведенной из эксплуатации шахте, приведены в табл. 13

Таблица 13

Результаты очистки вод, образующихся на выведенной из эксплуатации шахте

Металл	Входящие сточные воды, мг/л	Обработанные сточные воды на выходе после фильтрования, мг/л
Fe	25	< 0,1
Zn	40	< 0,5
Pb	1	< 0,04
Ag	< 0,1	< 0,1
Cd	< 0,1	< 0,01

Проектом было предусмотрено осуществление этой обработки в течение 20 лет, после чего в результате постепенного уменьшения содержания металлов в сточных водах они по своему составу могли бы стать совместимыми с природной средой.

В проект не было заложено применение установки **Densadag** на этапе отстаивания, поскольку в момент разработки проекта расход шахтных вод был относительно мал ($100 \text{ м}^3/\text{ч}$), тем не менее по остальным показателям это было бы наилучшим техническим решением.

В табл. 14 приведены результаты обработки подземных вод тоннеля «Argo» в Айдахо-Спрингс (США). Можно видеть, что применение идентичной системы при

Таблица 14
Обработка кислых шахтных вод тоннеля «Argo» в Айдахо-Спрингс
(шт. Колорадо, США)

Характеристика	Гарантированные показатели		Исходные шахтные воды		Обработанная вода	
	Всего	Растворимый	Всего	Растворимый	Всего	Растворимый
pH	6,5–9,0	Не нормируется	2,8		7,7	
Al, мг/л	Не нормируется	1,0	21,4	21,3	0,342	0,290
As, мг/л	Не нормируется	0,050	0,093	0,013	< 0,010	< 0,010
Cd, мг/л	Не нормируется	0,003	0,120	0,119	0,004	< 0,003
Cr, мг/л	Не нормируется	0,011	0,025	0,025	< 0,005	< 0,005
Cu, мг/л	Не нормируется	0,017	6,07	5,98	0,074	0,035
Fe, мг/л	1,0	0,30	144	109	0,144	0,033
Mn, мг/л	1,0	0,2	99,4	99,1	0,072	0,051
Ni, мг/л	Не нормируется	0,059	0,197	0,197	< 0,005	< 0,005
Pb, мг/л	Не нормируется	0,002	0,059	0,056	0,003	< 0,002
Zn, мг/л	Не нормируется	0,125	50,2	50,1	0,078	0,040

гораздо более высоких расходах подлежащих обработке вод с использованием установки **Densadeg** и фильтра **Greenleaf** привело к столь же впечатляющим результатам, что и в первом случае.