Данный файл представлен исключительно в ознакомительных целях.

Уважаемый читатель!
Если вы скопируете данный файл,
Вы должны незамедлительно удалить его сразу после ознакомления с содержанием.
Копируя и сохраняя его Вы принимаете на себя всю ответственность, согласно действующему международному законодательству .
Все авторские права на данный файл сохраняются за правообладателем.
Любое коммерческое и иное использование кроме предварительного ознакомления запрещено.

Публикация данного документа не преследует никакой коммерческой выгоды. Но такие документы способствуют быстрейшему профессиональному и духовному росту читателей и являются рекламой бумажных изданий таких документов.

Mémento technique
de l'eau

ЭН 03-230/1

„Дегремон"

Технические записки по проблемам воды

Москва
Стройиздат

Дегремон 1 Технические записки по проблемам воды

Mémento technique de l'eau

huitième édition

Degrémont 1978

„Дегремон"

Технические записки по проблемам воды

В двух томах

Том 1

Перевод с английского
Е. И. Апельциной, А. А. Виницкой,
Т. А. Карюхиной, В. А. Ксенофонтова,
И. Н. Чурбановой, В. Н. Швецова

Под редакцией кандидатов технических наук
Т. А. Карюхиной, И. Н. Чурбановой

Москва Стройиздат 1983

ББК 38.761
Т 38
УДК [628.16+628.3](—87)

Рекомендовано к изданию: чл.-кор. АН СССР С. В. Яковлевым и д-ром техн. наук С. А. Шубертом

Авторы: К. Бараке, Ж. Бебен, Ж. Бернар, Ф. Берне, Ж. Бушар, Д. Бургиня, Ж. Дюро, Р. Фламион, Г. Фромон, А. Обри, Р. Олька, Ж. Лемер, Р. Любутэн, Ж. Мармане, Ж. Миньо, П. Муше, М. Паре, Б. Рольт, И. Ришар, Ж.-М. Ровель, В. Саваль, Ж. Тардивель, А. Тишит, П. Трей, Ж. Бешо

Т 38 **Технические** записки по проблемам воды: Пер. с англ. В 2-х т. Т. 1 / К. Барак, Ж. Бебен, Ж. Бернар и др. Под ред. Т. А. Карюхиной, И. Н. Чурбановой. — М.: Стройиздат, 1983. — 607 с., ил.

Справочное издание фирмы «Дегремон» кратко можно охарактеризовать словами «все о воде». Обширный материал книги основан на обобщении последних достижений мировой практики в области обработки природных и сточных вод. В русском переводе книга издается в двух томах. В 1-м томе изложены теоретические основы процессов обработки воды и осадков, описаны конструкции очистных сооружений, методы автоматического контроля и управления работой.
Книга предназначена для инженерно-технических работников.

Т $\frac{3206000000-308}{047(01)-83}$ КБ—43—51—82

ББК 38.761
6С9.3

© Copyright by DEGRÉMONT, 1979
Перепечатка, даже частичная, запрещена
© Предисловие к русскому изданию. Перевод на русский язык, Стройиздат, 1983

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Предлагаемые вниманию советского читателя «Технические записки по проблемам воды» — первое издание на русском языке широко известной за рубежом книги французской фирмы «Дегремон».

Эта книга уникальна по широте охвата и освещению разнообразных проблем очистки воды и обработки осадков. Знакомство с ней позволяет составить полное представление об успехах в области водоснабжения и канализации, об уровне и глубине научных исследований в обосновании применяемых методов обработки воды, об огромном разнообразии конструкций сооружений одного и разных назначений, о направлениях развития науки и техники очистки воды в будущем.

В настоящее время технология обработки воды стала очень сложной, многоплановой отраслью инженерной техники. Она основывается на применении физических, химических и биологических процессов, а также самых различных их комбинаций. Трудно назвать такой химический и биохимический метод, который не был бы на вооружении инженерной технологии обработки воды. Вот почему стало насущной необходимостью дать специалистам своеобразный справочник, освещающий как теоретические, так и практические вопросы водной технологии. Этим потребностям в полной мере отвечает книга «Технические записки по проблемам воды» фирмы «Дегремон».

Авторы книги с позиций самого высокого гуманизма, обращаясь к читателям, напоминают:

вода не знает границ. Проблемы воды касаются всего человечества;

без воды нет жизни. Вода — это ценнейшее сырье, необходимое для любого вида деятельности человека;

запасы свежей воды не беспредельны. Все источники питьевой воды должны быть инвентаризованы, должны тщательно контролироваться, охраняться и, по возможности, пополняться;

загрязнение воды может нанести вред человеку или другим живым организмам; вода должна иметь качество, соответствующее виду ее использования и требованиям органов здравоохранения. Если использованная вода возвращается в окружающую среду, она не должна ей вредить;

вода — общее наследство. Это должен понимать каждый и использовать воду бережно;

для решения сложных проблем водного хозяйства необходимо объединение усилий специалистов всех стран мира.

Книга «Технические записки по проблемам воды» выдержала восемь изданий. Впервые она вышла в свет в 1950 г. Развитие науки и техники в области обработки воды было так стремительно, а полезность этой книги оказалась столь очевидной, что уже в 1952 г. фирма «Дегремон» выпустила в свет второе ее издание, переработанное и дополненное. Последующие издания были осуществлены в 1954, 1958, 1963, 1966, 1972 гг. и, наконец, последнее, восьмое, появилось в 1978 г.

С 1955 г. каждое новое издание книги переводится на английский язык, с 1959 — на испанский, с 1973 — на немецкий и с 1978 г. на сербско-хорватский языки. Настоящий перевод сделан с пятого английского издания 1979 г., соответствующего восьмому французскому изданию 1978 г. Приведенный перечень — красноречивое доказательство всевозрастающей популярности книги у специалистов многих стран мира.

Частые переиздания книги позволяют ее авторам своевременно отражать новейшие достижения в технике обработки природных и сточных вод. В качестве примера приведем последнее восьмое издание, в котором достаточно полно представлены методы удаления азота и, в частности, биологические процессы нитрификации и денитрификации, отсутствовавшие в седьмом издании книги.

Можно уверенно сказать, что каждое издание книги точно отражает уровень науки и техники своего времени и в этом смысле восемь изданий «Mеtènto technique de l'eau» являются своеобразной исторической энциклопедией развития методов обработки воды и осадков за последние тридцать лет.

Отметим, что книга широко популяризирует собственные разработки фирмы «Дегремон» — разнообразные конструкции очистных сооружений, рациональные их компоновки, приборы для контроля и управления работой сооружений. Особенно большие успехи в последние годы фирмой «Дегремон» достигнуты в области обработки производственных стоков; в соответствующих разделах книги читатель найдет материалы не только по методам очистки воды, применяемым в настоящее время, но и познакомится с наиболее перспективными направлениями развития этих методов в будущем.

В работе над русским изданием справочника приняли участие специалисты, много лет работающие в области водоснабжения и канализации. Было приложено немало усилий, чтобы максимально точно воспроизвести текст оригинала, что неизбежно повлекло за собой ряд трудностей, касающихся, в частности, терминологии. Мы полагаем, что свободное владение терминологией, применяемой в разных странах, необходимо для глубокого изучения специальной литературы.

Русское издание «Технических записок по проблемам воды» выходит в двух томах, каждый из которых содержит две части. Том 1 включает разнообразные сведения о воде, методах ее обработки и конструкциях очистных сооружений, а том 2 — обоснование выбора методов обработки воды в зависимости от ее исходного качества и назначения и обширный материал справочного характера.

Мы выражаем надежду, что советские читатели получат большое удовлетворение от знакомства со справочником фирмы «Дегремон».

Кандидаты технических наук
Т. А. КАРЮХИНА
И. Н. ЧУРБАНОВА

ПРЕДИСЛОВИЕ ФИРМЫ «ДЕГРЕМОН» К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Фирма «Дегремон» и редакторы всех изданий «Технических записок по проблемам воды» счастливы и горды тем, что эта книга публикуется на русском языке.

«Технические записки по проблемам воды» — плод работы группы французских специалистов, инженеров, техников, лаборантов и рабочих, проведенной на основе опыта, накопленного в области переработки всех видов воды во всем мире.

Специалисты различных стран, занимающиеся проблемами обработки воды, сталкиваются с одними и теми же вопросами:

обеспечение всего живого на нашей планете чистой и приятной на вкус питьевой водой;

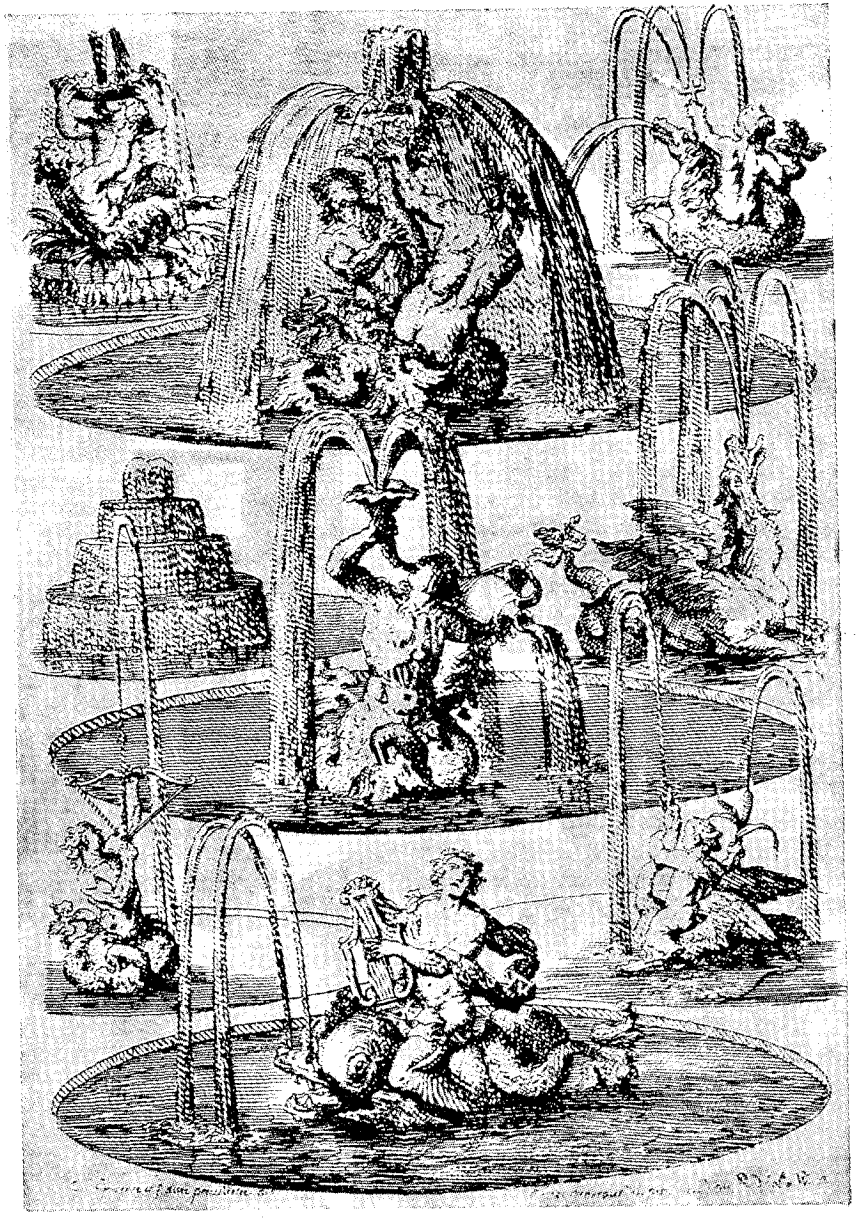
придание этому сырью, без которого невозможно развитие цивилизации, свойств, необходимых для каждого вида применения;

сброс отработанной воды в естественную среду, не нанося ей вреда, и возможность дальнейшего использования сбросов;

переработка шламов и отходов, поступающих с различных установок по очистке воды, с тем, чтобы они были полезными или, по крайней мере, безвредными для окружающей среды.

«Технические записки по проблемам воды» пытаются дать ответ на все эти вопросы.

Советские читатели уже знакомы с «Техническими записками» по предыдущим изданиям, но перевод на русский язык позволит ознакомить с ними более широкий круг людей, занимающихся проблемами обработки воды, и будет способствовать, как мы надеемся, сближению и сотрудничеству специалистов наших стран во имя общего дела — защиты жизни на Земле.



Часть первая

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ВОДЕ И МЕТОДАХ ОБРАБОТКИ ВОДЫ

1. ВОДА: ФИЗИКА, ХИМИЯ, БИОЛОГИЯ

Широко используемая природная вода за редким исключением недостаточно чиста и без соответствующей обработки не может быть применена для коммунального или промышленного водоснабжения. Вследствие циркуляции в почве, на поверхности земли и даже в воздухе она загрязнена частицами глины, стоками с полей, живыми организмами (планктоном, бактериями, вирусами), различными солями (хлоридами, сульфатами, карбонатами натрия или кальция, железа, марганца и др.), органическими веществами (гуминовыми и фульвокислотами, промышленными отходами) и газами.

Результаты двух типичных анализов (см. гл. 27) образцов поверхностных и грунтовых вод, характерных для Европы, приведены в табл. 1.1.

Чтобы сделать воду пригодной для применения, а также с целью защиты окружающей среды от загрязнений, воду, содержащую различного рода примеси, подвергают соответственно

ТАБЛИЦА 1.1

	Вода	
	речная	грунтовая
Температура, °С	14	9,5
Мутность	18	0,2
Цветность, мг/л	30	10
Взвешенные вещества, мг/л	25	0,35
pH	8	6,7
Общая щелочность, мг-экв/л	4	7
Общая жесткость, мг-экв/л	4,4	16
Хлориды, мг/л Cl^-	25	70
Сульфаты, мг/л SO_4^{2-}	18	330
Железо, мг/л Fe	1,4	3,5
Марганец, мг/л Mn	—	1,2
Аммоний, мг/л NH_4^+	0,7	1,5
Нитриты, мг/л NO_2^-	0,2	Следы
Нитраты, мг/л NO_3^-	3	1
Свободный CO_2, мг/л	4	135
Растворенный O_2, мг/л	9,5	Нет
Перманганатная окисляемость, определенная при нагревании в кислой среде, мг/л O_2	7,5	1,5

либо обработке, либо очистке (см. гл. 3). В процессе очистки всегда образуются отходы (или осадки), большинство которых не может быть удалено в окружающую среду без предварительной обработки с целью уменьшения их объема, обезвоживания или дезинфекции и т. п.

1.1. ВОДА И ЕЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

1.1.1. МОЛЕКУЛА ВОДЫ

Молекула воды состоит из комбинаций изотопов двух родов:

$$\left.\begin{array}{l} {}^{1}\text{H водород H} \\ {}^{2}\text{H дейтерий D} \\ {}^{3}\text{H тритий T} \end{array}\right\} \text{ и } \left.\begin{array}{l} {}^{16}\text{O} \\ {}^{17}\text{O} \\ {}^{18}\text{O} \end{array}\right\}^{*}$$

Теоретически может быть составлено 18 типов молекул, но если принять во внимание, что доли содержания ^{3}H, ^{17}O, ^{18}O в природе ничтожно малы, число молекул уменьшается до H_2O, D_2O и НДО. Молярная фракция дейтерия в природном водороде близка к $^{1}/_{6000}$, а для трития она составляет $4 \cdot 10^{-15}$. Поэтому в первом приближении формула воды может быть написана как H_2O. Молекула воды имеет электрический момент, обусловливающий ее физические и электрические свойства. Вода — типичная жидкость полярного типа (иногда называемая диполем).

Тяжелая вода, физические свойства которой несколько отличаются от свойств легкой воды, имеет химическую формулу $Д_2{}^{16}O$.

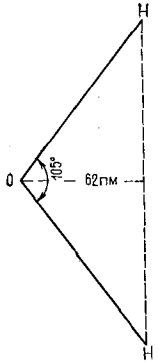


Рис. 1.1.

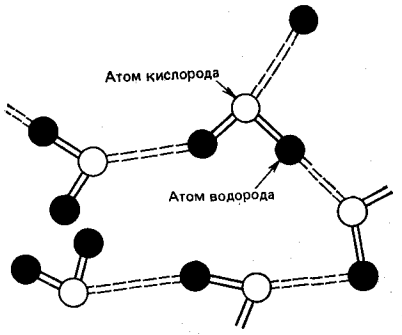


Рис. 1.2.

* Химические обозначения см. на с. 904.

Для изображения молекулы воды используется треугольная диаграмма, как показано на рис. 1.1 и 1.2. Если бы связь О—Н была строго ковалентной, то угол НОН должен составить 90°. В действительности вследствие электроотрицательных свойств кислорода угол между связями О—Н составляет примерно 105°.

Расстояние от атома кислорода до центра оси атомов H^+ равно 62 пм.

1.1.2. ТРИ СОСТОЯНИЯ

Структура воды зависит от ее физического состояния. Состоянию газа или пара точно соответствует формула H_2O и треугольная диаграмма молекулы. Конденсированные состояния (вода и лед) характеризуются большей плотностью упаковки, которая определяет степень отклонений свойств от нормы.

В твердом состоянии элементарный конгломерат представляет собой расположенную в центре молекулу воды, которая окружена четырьмя периферическими молекулами, образующими форму тетраэдра.

Изучение кристаллографических состояний, главным образом с помощью Раман-спектра, дает возможность понять сущность перехода открытой кристаллической структуры льда в жидкое состояние. В жидком состоянии несколько молекул воды ассоциированы специфическими связями, называемыми водородными, когда каждый атом водорода связан с атомом кислорода соседней молекулы. Структура по форме — тетраэдрическая.

1.1.3. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

В процессе обработки воды наиболее важно учитывать следующие физические свойства: плотность, тепловые характеристики, вязкость, поверхностное натяжение, электрические и оптические свойства.

Плотность. Вследствие образования уплотненной молекулярной структуры плотность воды изменяется в зависимости от температуры и давления. Максимума она достигает при 4,08 °С и давлении 0,1 МПа, 3,8 °С и давлении 0,4 МПа и 3,4 °С и давлении 1 МПа. Плотность чистой воды при 15 °С и атмосферном давлении составляет 0,9990 кг/дм³. Для природной воды значение удельной массы колеблется в зависимости от содержания растворенных веществ. Морская вода с концентрацией солей 35 г/л имеет среднюю плотность 1,0281 кг/дм³ при 0 °С. Изменение солесодержания на 1 г/л изменяет плотность на 0,0008 кг/дм³.

Тепловые характеристики. Теплоемкость составляет 4180 Дж/(кг·°С) при 0 °С. Она изменяется в зависимости от температуры и достигает минимума при +35 °С. Скрытая теп-

лота плавления при переходе льда в жидкое состояние составляет 330 кДж/кг, скрытая теплота парообразования 2250 кДж/кг при нормальном давлении и температуре 100 °С.

Вследствие значительных величин теплоемкости и скрытой теплоты трансформации воды огромные ее объемы на поверхности земли представляют собой аккумуляторы тепла. Эти же свойства воды обусловливают ее использование в промышленности в качестве теплоносителя.

Вязкость характеризует способность жидкости оказывать сопротивление различному движению как внутреннему, так и любому другому. Вязкость — основная причина потерь тепла, а потому она играет важнейшую роль в процессе обработки воды. С повышением температуры вязкость уменьшается. Наблюдается следующее изменение динамической вязкости в зависимости от температуры:

t, °С	0	5	10	15	20	25	30	35
10^{-3} Па·с	1,797	1,523	1,301	1,138	1,007	0,895	0,800	0,723

С другой стороны, она увеличивается с повышением содержания растворенных солей, поэтому у морской воды вязкость больше, чем у речной:

Солесодержание по иону Cl^-, г/л	0	4	8	12	16	20
Коэффициент вязкости при 20°С, 10^{-3} Па·с	1,007	1,021	1,035	1,052	1,068	1,085

Давление оказывает особое воздействие на абсолютную вязкость воды. При умеренном давлении и низкой температуре вода становится менее вязкой, чем другие жидкости; происходит разрушение молекулярной структуры воды. Если давление увеличивать, вода примет структуру жидкости, на которую внешнее воздействие не оказывает влияния; в этом случае по общим законам вязкость воды возрастает с повышением давления.

Поверхностное натяжение — характеристика, свойственная поверхности раздела (поверхности на границе двух фаз). Оно определяется как сила натяжения, возникающая на поверхности жидкости, в результате действия которой площадь поверхности уменьшается до максимально возможного предела.

Поверхностное натяжение γ воды составляет $73 \cdot 10^{-3}$ Н/м при 18 °С и $52{,}5 \cdot 10^{-3}$ Н/м при 100 °С. Такое поверхностное натяжение обеспечивает подъем уровня воды на 15 см при 18 °С в капиллярной трубке диаметром 0,1 мм.

Добавление растворенных солей обычно увеличивает поверхностное натяжение ($\gamma = 74{,}6 \cdot 10^{-3}$ Н/м для водного раствора NaCl с концентрацией соли 1 моль/л при 18 °С). Некоторые вещества понижают поверхностное натяжение; их называют поверхностно-активными.

Электрические свойства воды: диэлектрическая постоянная и электрическая проводимость чистой воды. Диэлектрическая

постоянная ε, равная 80, одна из наиболее высоких из всех известных величин; она объясняет причину значительной ионизирующей силы воды. Вода — слабый проводник электрического тока и в этом отношении ее поведение подчиняется закону Ома. Электрическая проводимость чистой воды $K = 4{,}2 \cdot 10^{-6}$ См/м при 20 °С, что соответствует удельному сопротивлению 23,8 МОм·см. Наличие растворенных солей в воде увеличивает ее электрическую проводимость, которая изменяется в зависимости от температуры.

Оптические свойства. Прозрачность воды зависит от длины волны луча, проходящего через воду. Ультрафиолетовые лучи проходят через воду легко, и инфракрасные едва проникают в нее, что существенно с физической и биологической точек зрения. Вода поглощает бо́льшую часть оранжевых и красных компонентов видимого света; этим объясняется голубая окраска большой толщи воды. Степень ее прозрачности часто используется для измерения определенных форм примесей и, соответственно, эффективности очистки воды.

1.2. ВОДА И ХИМИЯ

Энергия образования молекулы воды высока и составляет 242 кДж/моль. Поэтому вода химически весьма устойчива, особенно в природных условиях. Эта устойчивость в сочетании с электрическими характеристиками воды и молекулярным строением делает воду практически универсальным растворителем для многих веществ. В самом деле, большинство минеральных и органических веществ, а также газов растворимы в воде.

1.2.1. ВОДА КАК РАСТВОРИТЕЛЬ

Чтобы растворить вещество, нужно разрушить силы сцепления, создающиеся благодаря электростатическим или ковалентным силам, которые могут быть:

межатомными строго химическими связями; ковалентными связями (между атомами), электровалентными или ионными связями (атом — электроны);

межмолекулярными связями сцепления между молекулами (водородные связи);

слабыми силами притяжения (Лондон, Ван-дер-Ваальс).

Такое разнообразие связей объясняет множество различных состояний вещества.

Силы гидратации воды (биполярной молекулы) полностью или частично разрушают (начиная со слабых сил притяжения) различные электростатические связи между атомами и молекулами растворенного вещества. Эти связи заменяются новыми связями с молекулами воды, обусловливающими возникновение новых структур, что приводит к истинно химическим реакциям

(сольватации). При полной сольватации происходит образование раствора.

1.2.1.1. Растворимость веществ в различных фазах. *Газы.* Растворимость их подчиняется закону Генри, по которому количество газа, способного раствориться, пропорционально коэффициенту растворимости α каждого газа, концентрации C газа в газовой фазе и общему давлению P газовой фазы над водой. Объем растворяющегося газа равен $V=\alpha CP$.

ТАБЛИЦА 1.2

Газ	Значение коэффициента растворимости α при 10 °С	Растворимость чистых газов, мг/л, при температуре 10 °С и давлении 0,1 МПа
N_2	0,018	23,2
O_2	0,038	54,3
CO_2	0,194	2318
H_2S	3,39	5112

Ангидриды (CO_2, SO_2) и различные газообразные кислоты (HCl), растворяясь в воде, вступают в реакцию с ней. Коэффициент растворимости таких соединений намного выше, чем у многих других газов.

Кислород более растворим, чем азот; экстрагируемые из воды растворенные газы богаче кислородом, чем исходный воздух.

Жидкости. Так как молекула воды полярна, растворимость жидкости в воде зависит от полярности молекул растворяемой жидкости. Например, молекулы, содержащие группы OH^- (спирты, сахара), SH^- и NH_2^-, сильно полярны и хорошо растворимы в воде, между тем другие жидкости (углеводороды, четыреххлористый углерод, масла и жиры и т. д.) будучи неполярными очень слабо растворимы в воде. Имеются частично растворимые вещества, которые смешиваются только при температуре выше критической (так вода и фенол смешиваются при температуре выше 63,5 °С), или ниже критической температуры (триметиламин растворяется во всех пропорциях, но при температуре ниже 18,5 °С) или же при температуре, находящейся в пределах между двумя критическими, высшей и низшей (водно-никотиновая система).

Твердые вещества. Растворимость, которая определяется максимальной массой вещества, растворяющегося в данной массе растворителя, имеет точное значение только при растворении кристаллических веществ. В случае растворения макромолекулярных веществ подобного точного равновесия, какое существует между кристаллическим веществом и соответствующим насыщенным раствором, не создается; часто не наблюдается разрыва между протекающим непрерывно переходом вещества из твердого состояния в раствор. Более того, раствор макромолекул обычно содержит молекулярные частицы различных размеров. При очистке воды приходится учитывать размер и электрический заряд растворенных частиц, поэтому следует различать типы растворов и суспензий (см. рис. 1.3).

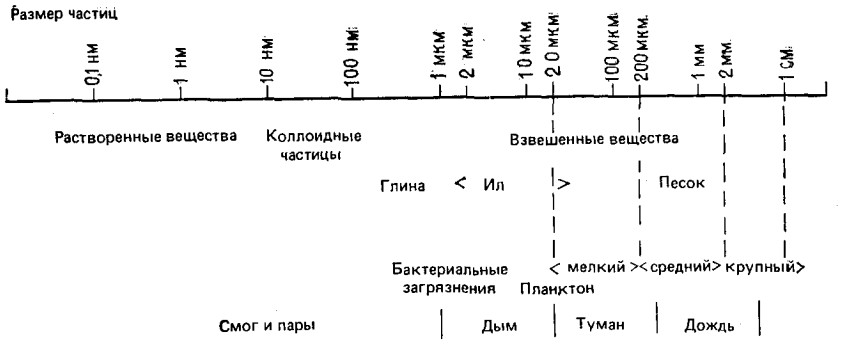


Рис. 1.3.

Истинный или молекулярный раствор представляет собой гомогенную (однофазную) систему. В кристаллоидном растворе растворенные частицы представлены малыми молекулами (менее нанометра) как ионизированными (кислоты, щелочи, соли), так и неионизированными (сахара и т. п.). Макромолекулярный раствор образуется из частиц размером более нанометра, он может включать ионизированные группы.

Коллоидные суспензии, называемые также мицеллярными или псевдорастворами, состоят из двух фаз и являются четко выраженными гетерогенными системами, в которых диспергированные частицы разных размеров представляют собой скопления атомов (металлы) или молекул. Суспензии (с твердыми веществами) и эмульсии (с жидкостями) образуются из частиц, видимых в оптический микроскоп.

1.2.1.2. Гидрофилизация. Растворимость вещества может быть различной в зависимости от типа растворителя. Например, хлористый натрий растворяется в воде лучше, чем в спирте, а парафин — лучше растворяется в бензоле, чем в воде.

Растворимость в воде зависит от природы вещества, или более определенно, от функциональных групп, входящих в его состав; поэтому характерные группы классифицируются на гидрофильные (OH—CO—NH_2 и т. д.) и гидрофобные (CH_3—CH_2—C_6H_5).

В некоторых случаях растворение или простое смачивание осуществляется с помощью третьего составляющего, называемого солюбилизатором для истинных растворов и пептизатором для коллоидных, эмульсификатором для эмульсий, стабилизатором для коллоидных суспензий и смачивающим агентом для действия на поверхности. Эти вспомогательные агенты являются связующими между растворителем и растворяемым веществом, поддерживая последнее в диспергированном или смоченном состоянии.

Связующая способность растворителя обусловлена его гидрофильной группой, а связующая способность трансформируе-

мого вещества — либо химической природой (в результате действия щелочей или сильных кислот), либо силами когезии. Последняя образуется вследствие асимметричности (полугидрофильности) молекул. Один конец молекулы имеет сродство к воде и является гидрофильным, а другой имеет тенденцию к ассоциации (действие детергентов, тринатрийфосфата, смачивающих агентов) с молекулами стабилизируемого вещества или вещества, адсорбируемого на его поверхности. Образуются более гидрофильные частицы или адсорбированные комплексы.

Некоторые агенты могут разрушать связи между растворителем и веществом, находящимся в растворенном состоянии, диспергированном или смоченном. В зависимости от характера действия подобные агенты называются осадителями, коагулянтами, флокулянтами, уплотнителями или депрессантами. Такое разрушение может быть вызвано химическим воздействием (например, нейтрализацией OH^- ионов или ионизированных групп). Вспомогательные агенты способны разрушать полугидрофильные ковалентные связи вследствие нейтрализации гидрофильной части или притягиванием гидрофильной части к поверхности либо пузырька воздуха (флотация), либо к более или менее гидрофильному нерастворенному адсорбенту. Разрушение вызывается также в результате нейтрализации электростатических сил (действие поливалентных катионов и ионных полиэлектролитов).

1.2.1.3. Истинные растворы. Соотношение между растворенным веществом и растворителем может быть выражено:

концентрацией по массе (число единиц массы растворенного вещества в единице массы растворителя);

молярной долей (отношение числа молей растворенного вещества к общему числу молей, т. е. растворитель+растворенное вещество);

моляльностью (число молей, растворенных в 1000 г растворителя);

молярностью (число молей, растворенных в 1 л раствора).

Молекулы растворенного вещества ведут себя в растворителе точно так же, как молекула газа в другом газе. Сильно разбавленные растворы хорошо описываются законами идеальных газов. Если концентрация значительна, растворенные молекулы менее активны, чем то же число молекул идеального газа. Концентрация (c) заменяется в этом случае активностью $[a]$:

$$[a] = (c)f,$$

где f — коэффициент активности, который стремится к единице, когда раствор очень разбавлен.

Согласно закону действия масс, для реакции $aA+bB \rightleftarrows cC+dD$, в результате замены концентрации на активность, получаем:

$$\frac{(A)^a(B)^b}{(C)^c(D)^d} \cdot \frac{f_A^a f_B^b}{f_C^c f_D^d} = K,$$

$$\frac{(A)^a(B)^b}{(C)^c(D)^d} = K\frac{f_C^c f_D^d}{f_A^a f_B^b} = K'.$$

Термодинамическая константа диссоциации K может быть выражена по отношению к продукту реакции

$$K = K'\frac{f_A^a f_B^b}{f_C^c f_D^d},$$

где K' является константой диссоциации при данной концентрации; f — коэффициент активности веществ, находящихся в состоянии равновесия.

Формула Дебая дает возможность вычислить коэффициент активности по величине ионной силы. Для воды с солесодержанием менее 1,5 г/л можно применить следующее приближенное выражение (для каждого иона):

$$-\lg f_x = \frac{AZ^2\sqrt{\mu}}{1+1{,}4\sqrt{\mu}},$$

где Z — заряд (валентность) иона x с молярной концентрацией C; μ — общая ионная сила $\left(\frac{1}{2}C_1Z_1^2+\frac{1}{2}C_2Z_2^2+\ldots\right)$.

Значение константы A зависит от температуры:

t°C	15	25	35	100
A	0,503	0,511	0,520	0,61

Значение K', вычисленное по упрощенной формуле Дебая, справедливо, когда ионная сила раствора меньше 0,1. Если ионная сила высокая, должны быть использованы более сложные формулы (здесь не приводятся).

Удобно использовать выражение $pK = -\lg K$. В справочной литературе приводятся значения pK, используемые в различных вычислениях, связанных с законом действия масс. Константу диссоциации для данной ионной силы вычисляют по формуле

$$pK' = pK + \left(-\lg\frac{f_C f_D}{f_A f_B}\right),$$

1.2.1.4. Ионизация. Вследствие растворения некоторых веществ (например, минеральных солей) можно наблюдать проявление электрических свойств жидкости, например электрическую проводимость, электролиз и т. п., которые вызываются частичной диссоциацией молекул на простые электрозаряженные составляющие: катионы и анионы.

Соотношение недиссоциированных молекул и различных ионов определяется главным образом законом действия масс. Некоторые кислоты и щелочи, даже в относительно концентрированных растворах, диссоциированы полностью. Они называются сильными электролитами. Например, обычный раствор хлористого натрия не содержит молекул NaCl, а только Cl^- и Na^+ ионы. Другие вещества, такие как уксусная кислота CH_3COOH, лишь частично диссоциированы в растворе. Они являются слабыми электролитами. В этих случаях мы должны различать общую кислотность, определяемую теоретически возможным количеством ионов H^+, и свободную кислотность, которая описывается количеством H^+ ионов, действительно присутствующих в растворе.

Сама вода частично диссоциирована на ионы по реакции $H_2O \rightleftarrows H^+ + OH^-$, которая означает, что в воде имеются как молекулы H_2O, так и ионы OH^- (гидроксил-ионы) и ионы H^+ (и, кроме того, гидратированные формы H^+, H_2O или H_3O^+, последний называется ионом оксония).

Применение закона действия масс к воде: понятие pH. Полагая, что коэффициенты ионной активности равны 1, получим

$$\frac{(H^+)\,(OH^-)}{(H_2O)} = K.$$

Так как степень диссоциации очень мала, концентрация молекул воды всегда постоянна, и мы можем написать: $(H^+)\,(OH^-) = K_e$.

Значение ионного произведения воды составляет 10^{-14} (моль/л)^2 при 23 °C. Это значение изменяется в зависимости от температуры (табл. 1.3).

ТАБЛИЦА 1.3

Температура, °C	$K_e 10^{14}$	pK_e
0	0,12	14,93
18	0,59	14,23
25	1,04	13,98
50	5,66	13,25
100	58,5	12,24

В чистой воде $(H^+) = (OH)^- = 10^{-7}$ моль/л. Кислой средой принято называть раствор, в котором $(H^+) > 10^{-7}$ моль/л, а щелочной средой — раствор, в котором $(H^+) < 10^{-7}$ моль/л. Для определения кислотности или щелочности раствора используют величину pH (водородный показатель), который выражается отрицательным десятичным логарифмом концентрации водородных ионов: $pH = -\lg[H^+]$. Значение pH измеряют с помощью окрашенных индикаторов или преимущественно электрометрическим методом (pH-метром со стеклянным электродом).

Сила кислоты и щелочи в водном растворе. Кислота — соединение, способное терять протоны, т. е. H^+ ионы, а щелочь — присоединять эти ионы. Таким образом, в водном растворе имеется кислотно-щелочная пара, определяемая равновесием:

$$\text{Кислота} + H_2O \rightleftarrows \text{Щелочь} + H^+.$$

Применяя закон действия масс и полагая, что концентрация молекул H_2O постоянна, получим:

$$\frac{[\text{Щелочь}]\,[H^+]}{[\text{Кислота}]} = K_A \text{ и } pK_A = -\lg K_A.$$

Вычисленное таким образом значение K_A есть константа сродства кислотно-щелочной пары.

Сила кислоты определяется количеством отдаваемых ионов H^+. Кислота будет тем сильнее, чем больше значение K_A или меньше значение pK_A, а щелочь — тем сильнее, чем меньше K_A. Отсюда ион аммония NH_4^+ — это слабая кислота с $pK_A = 9{,}2$. Соответствующее основание NH_4OH — достаточно сильная щелочь.

В табл. 26.5 кислоты представлены в порядке уменьшения их силы, а основания — в порядке возрастания. Кислота будет реагировать с любым основанием, которое расположено в таблице ниже этой кислоты. Реакция не проходит до конца, если разница в значениях pK менее 5,4 единиц.

Если закон действия масс написан относительно концентраций (получаемых из анализов) вместо активностей, то константы диссоциации K_A или pK_A могут быть вычислены, если известна ионная сила. Зная pK_A, можно вычислить pH смеси соответствующего раствора кислоты, щелочи или соли:
pH раствора кислоты при общей концентрации c будет:

$$pH = \frac{1}{2} pK_A - \frac{1}{2} \lg c,$$

pH раствора щелочи:

$$pH = 7 + \frac{1}{2} pK_A + \frac{1}{2} \lg c,$$

pH раствора соли:

$$pH = \frac{1}{2} pK_1 + \frac{1}{2} pK_2,$$

где K_1 и K_2 — константы сродства соответствующих кислот и оснований.

Буферные растворы. При смешивании кислоты (концентрация A) с соответствующим основанием (концентрация B), если $A = B$, получим буферный раствор (например, уксусная кислота — ацетат). В буферном растворе значение pH мало изменяется с увеличением или уменьшением концентрации ионов H^+. Такие растворы используют тогда, когда желательно, чтобы реакция проходила при постоянном значении pH.

Ацетаты, фталевая кислота и однозамещенный фосфорнокислый калий служат в качестве основы при приготовлении многих буферных растворов.

Растворимость слаборастворимых соединений. Произведение растворимости. Состояние ионного равновесия слаборастворо-

римых или нерастворимых веществ может быть представлено следующим образом:

$$AC \rightleftarrows A^- + C^+;$$
$$[A^-][C^+] = k_s.$$

Значение k_s или произведение растворимости есть константа для данной температуры и ионной силы раствора. Значение k_s меньше значения растворимости вещества. Для карбоната кальция, растворимость которого составляет 12 мг/л, произведение растворимости k_s равно $10^{-8,32}$ (моль/л)^2. По аналогии с pH можно написать:

$$pk_s = -\lg 10^{-8,32} = 8,32.$$

1.2.2. ОКИСЛЕНИЕ — ВОССТАНОВЛЕНИЕ (ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНЫЕ РЕАКЦИИ)

В зависимости от условий эксперимента вода может принимать участие в окислительно-восстановительных реакциях

$$2H_2O - 4e^- \rightleftarrows 4H^+ + O_2\uparrow;$$
$$2H_2O + 2e^- \rightleftarrows 2OH^- + H_2\uparrow.$$

В первой реакции вода является донором электронов и выполняет функции восстановительного агента: акцептора электронов — окислителя. В присутствии окислителя из воды выделяется кислород. Во второй реакции вода является акцептором электронов; она — окислитель: донор электронов — восстановительный агент. В присутствии восстановительного агента из воды выделяется водород. Но обе реакции без катализатора проходят очень слабо и обычно участием воды в соответствующих восстановительных реакциях можно пренебречь.

Однако сильные окислители и восстановители реагируют с водой очень быстро: например, хлор легко переходит в состояние Cl^- аниона:

$$Cl_2 + 2e^- \rightarrow 2Cl^-.$$

Или в реакции с водой:

$$2Cl_2 + 2H_2O \rightarrow 4H^+ + 4Cl^- + O_2,$$

когда выделяется кислород и среда становится кислой.

Молекула воды может распадаться на кислород и водород

$$2H_2O \rightleftarrows 2H_2 + O_2$$

в нейтральной среде, при соответствующем равенстве давлений водорода и кислорода и $PH_2 = 10^{-28}$ МПа.

Понятие окислительно-восстановительного потенциала дает нам возможность классифицировать различные окислители и восстановители по отношению к водороду и, таким образом, сравнить их между собой (см. гл. 3).

1.3. ВОДА И БИОЛОГИЯ

Тепловые характеристики воды являются одними из важнейших факторов термической стабильности биосферы.

Вода участвует в биологическом круговороте, в процессе которого претерпевает ряд изменений. Поскольку она является растворителем, в чистом виде в природе не встречается. В ней содержатся минеральные и органические вещества, не только полезные, используемые в качестве элементов питания (как вне живого организма, так и внутри его), но и вредные, представляющие собой загрязнения, которые вода получает, если используется в качестве приемника, в частности, сточных вод, образующихся в результате жизнедеятельности человека.

Вода является важнейшей составной частью живого организма. Наименьший процент ее (от 22 до 34%) содержится в костях; в жировой ткани различных внутренних органов он достигает 70—80%, а наивысший процент (82—94) — в нервных волокнах. Вода в протоплазме образует коллоидный раствор молекул белка вследствие сольватации концов этих молекул.

В продуктах нашего питания вода составляет бо́льшую часть, %:

растительные масла и фрукты . . .	78—97
рыба	~80
мясо	~72

1.3.1. ВОДА И КЛЕТОЧНЫЙ МЕТАБОЛИЗМ

Для поддержания ритма активной деятельности живые клетки отыскивают в окружающей среде вещества, называемые основными метаболитами. Некоторые клетки способны синтезировать их из минеральных компонентов; они трансформируют воду, диоксид углерода и минеральные соли в вещества тела клетки, молекулярная структура которых исключительно сложна.

Автотрофные организмы получают необходимую энергию из внешней среды (энергии света или химической энергии, выделяемой вследствие преобразования определенных минеральных радикалов), часть которой они запасают в виде потенциальной энергии, используемой с течением времени. Между тем гетеротрофные организмы не способны синтезировать все вещества, требующиеся для их роста. Они используют питательные вещества, которые расщепляют и окисляют экзотермически на простые вещества. Выделяемая вследствие этих химических реакций кинетическая энергия используется клетками для их роста, передвижения, размножения.

Термин метаболизм используют для описания всех энергетических реакций; термин анаболизм применяют, когда организм получает потенциальную энергию (эндотермические реакции) и

осуществляет синтез живого вещества, а катаболизм — когда организмы получают кинетическую энергию (экзотермические реакции) и осуществляет деградацию питательных веществ.

Живые организмы	автотрофы	фототрофы (хлорофиллные организмы)	фотосинтез
		хемотрофы (нехлорофильные) различные бактерии	окисление—восстановление
	гетеротрофы	вирусы, бактерии, грибы, животные	

Изучение источников энергии составляет существенную часть в анализе фотосинтеза и окислительных явлений в ферментативных процессах.

1.3.1.1. Анаболизм. *Фотосинтез.* Типичным примером фотосинтеза служит синтез глюкозы (углеводов) растениями из CO_2 атмосферы и воды сока растений с помощью солнечной энергии и в присутствии хлорофилла. Фотосинтез может быть суммарно описан уравнением:

$$6CO_2 + 6H_2O \rightarrow C_6H_{12}O_6 + 6O_2 - 2{,}72 \text{ кДж/моль.}$$

Этот биологический процесс количественно один из самых важных в мире.

Окисление минеральных веществ. Ряд автотрофных организмов не способен утилизировать солнечную энергию, поскольку лишен определенных пигментов. Они получают энергию, необходимую для их существования, в результате окисления минеральных веществ. Важно отметить здесь Nitrosomonas, которые окисляют аммиак в нитриты, Nitrobacter, трансформирующие нитриты в нитраты, железобактерии и марганцовистые бактерии, которые окисляют двухвалентное железо и бикарбонат марганца, соответственно в трехвалентное и гидроокись марганца, серобактерии, которые трансформируют сероводород в коллоидную серу, сульфатредуцирующие бактерии, восстанавливающие сульфат в сероводород и тиобациллы, окисляющие последний в серную кислоту.

1.3.1.2. Катаболизм. Ферментативные процессы. Катаболизм, или процесс внутриклеточного разрушения питательных веществ, включает образование воды или участие молекул воды в окислении органических веществ, и восстановительные реакции, обеспечивающие использование химической энергии, содержащейся во всех питательных веществах.

Термины анаэробный и аэробный применяют для характеристики типа разрушения, которое фактически является дегидрогенизацией внутри гетеротрофных клеток. Если водород соединяется с молекулярным кислородом, процесс называется аэробным. Если же процесс включает перенос водорода от дегидрируемого соединения к акцептору водорода, но не молекулярному

кислороду, он называется анаэробным. Поэтому разделяют бактерии на строго аэробные, строго анаэробные (облигатные) и промежуточные (факультативные).

Движущая сила разрушения (аэробного или анаэробного) органического вещества обеспечивается действием ферментов (энзимов) организмов, представляющих собой сложные белки (с точной пространственной ориентацией), с которыми соединяются органические молекулы или субстраты.

Различают внеклеточные ферменты, которые разрушают очень сложные молекулярные структуры веществ, чтобы обеспечить возможность их проникновения в клетку, и внутриклеточные ферменты, которые участвуют в процессе ассимиляции и таким образом являются основой процессов жизнедеятельности, ведущих к размножению клеток. Энзимы — биологические катализаторы, которые во время процесса биологического окисления трансформируются и затем регенерируются.

Важнейшие свойства энзимов обусловлены их структурой. В зависимости от того, в каких условиях идет процесс биологического окисления — аэробных или анаэробных, — образуются различные конечные продукты распада. Например, при окислении глюкозы:

в аэробных условиях

$$C_6H_{12}O_6 + 6O_2 \rightarrow 6CO_2 + 6H_2O + 2{,}72 \text{ кДж/моль,}$$

в анаэробных условиях

$$C_6H_{12}O_6 \rightarrow 3CO_2 + 3CH_4 + 144 \text{ кДж/моль.}$$

Выход энергии в анаэробных условиях составляет всего 5,3% количества энергии, высвобождаемой в аэробных условиях. Поскольку вероятно, что количество энергии, необходимое для репродуцирования новых клеток, одинаково в обоих случаях, полагают, что в аэробных условиях процесс получения жизненной энергии значительно более экономичен, чем в анаэробных. Другими словами, клеточное деление значительно обильнее в первом случае, чем во втором, и как следствие этого, процессы разрушения веществ до конечного состояния проходят быстрее.

1.3.2. ВОДА — СРЕДА ДЛЯ ЖИЗНИ МИКРОБОВ

В живой природе существует группа живых существ, невидимых, но вездесущих, которые трудно отнести к животному или растительному миру, так как они предшествуют этим двум сообществам. Они имеют большое значение для поддержания биологической активности: это — микробы, преимущественно одноклеточные, постоянная деятельность которых играет важную роль в круговороте веществ и без участия которых в процессах разложения и синтеза жизнь остановилась бы.

Непрерывно возрастающая потребность в воде для человека приводит к все большему ее загрязнению. Медицина и био-

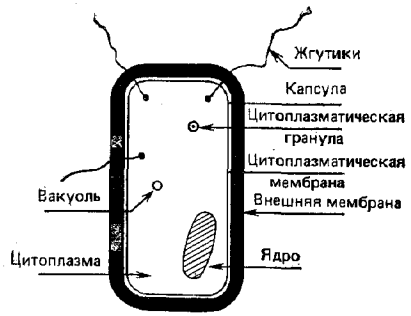


Рис. 1.4.

логия изучили роль воды в возникновении и передаче некоторых болезней. В связи с этим появилась необходимость идентифицировать ряд организмов и вести борьбу с многими из тех, которые содержатся в воде. Эти организмы называются патогенными (см. с. 1011).

Однако, с другой стороны, установлено, что развитие нежелательных микробиальных процессов можно приостановить, ибо человек в состоянии «приручить» микроорганизмы и даже усилить физиологическую активность или процессы синтеза некоторых полезных микробов.

Численность патогенных организмов значительно меньше, чем полезных.

Среди наиболее важных микроорганизмов воды можно назвать бактерии. Подобно всем живым клеткам, бактериальная клетка имеет ядро, включающее главным образом хромосомы, сосредоточенные в хроматине и состоящие из дезоксирибонуклеиновой кислоты (ДНК). Ядро контролирует воспроизводство, сохраняет родословную клетки в генетическом коде и управляет с помощью РНК (рибонуклеиновой кислоты) синтезом белков и особенно энзимов в цитоплазме; цитоплазма содержит рибосомы, богатые РНК, а также различные органеллы — митохондрии, лизосомы и т. п., каждая из которых играет определенную роль. Бактериальная клетка окружена внешней ригидной оболочкой, придающей бактерии ее форму. Движение микроорганизмов осуществляется с помощью ворсинок или жгутиков (рис. 1.4).

Отношение площади поверхности к объему больше, чем у других организмов. Скорость метаболизма определяется этим отношением; бактерии более активные и более подвижные организмы.

Скорость деления зависит от концентрации питательных веществ в среде. В наиболее благоприятных случаях деление клеток наблюдается через 15—30 мин; иногда на этот процесс затрачивается несколько суток.

Бактерии живут в среде, удовлетворяющей определенным характеристикам по содержанию воды, pH, солесодержанию, окислительно-восстановительному потенциалу и температуре. Предпочтительная величина окислительно-восстановительного потенциала зависит от того, развиваются ли организмы в аэробных или анаэробных условиях. Эти условия тесно связаны со строением систем энзимов бактерий. Огромное разнообразие

в характеристиках среды обитания способствовало селекции видов. Вследствие мутаций в генах хромосом происходят изменения в системах энзимов.

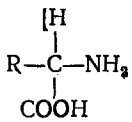
По оптимальной температуре для их энзимов бактерии могут быть разделены на термофильные ($t>40\,^{\circ}C$), мезофильные ($t\approx 30\,^{\circ}C$), психрофильные ($t=0$—$15\,^{\circ}C$) и криофильные ($t=-5$—$0\,^{\circ}C$).

Некоторые виды бактерий обладают способностью к спорообразованию. Образующиеся споры являются клетками с таким состоянием вещества, которое более устойчиво, например, к нагреванию и обезвоживанию. Когда условия возвращаются к нормальным, споры прорастают и превращаются в активную бактерию. Поэтому комплекс бактериальной культуры может адаптировать себя посредством селекции и мутаций к небольшим изменениям в составе субстрата, на котором он развивается.

Для гетеротрофных организмов главными элементами питания являются белки, углеводы и жиры.

1.3.3. ПИТАТЕЛЬНЫЕ ВЕЩЕСТВА

Белки, наиболее важный элемент живой материи, образуют основу протоплазменного и цитоплазменного вещества. Они состоят из группы простых веществ — аминокислот, в молекуле которых содержится одна или более кислотных групп COOH и одна или более аминогруппы NH_2, соединенных через углеродный атом:



Белки ведут себя подобно кислотам или щелочам в зависимости от pH среды, в которой они локализованы.

Кислотные и аминофункциональные группы могут быть соединены друг с другом и в результате образовывать длинноцепочные макромолекулы с очень большой молекулярной массой (50 тыс. и больше).

Следует различать пептиды, простые белки и сложные белки.

Углеводы называют сахарами за приятный вкус простейшего их представителя, или карбогидратами, так как их состав соответствует общей формуле $Cm(H_2O)_n$. Они находятся в изобилии в растительной ткани и служат обычной пищей гетеротрофных организмов.

Углеводы могут быть негидролизуемыми (простые сахара, например глюкоза) и гидролизуемыми (озиды, например, крахмал, целлюлоза и гликоген).

Простые или сложные жиры представляют собой эфиры более или менее сложных жирных кислот и спиртов. Они способны образовывать в воде эмульсии, но, как правило, являются нерастворимыми. Жиры входят в состав растительных и животных тканей в качестве важнейшего резервного материала для удовлетворения энергетических потребностей.

В определенных условиях гетеротрофные организмы могут приспособиться к использованию в качестве пищи и других органических веществ, таких как фенолы, альдегиды, углеводороды и т. д.

Автотрофные организмы в состоянии синтезировать тело клетки, используя субстраты, содержащие минеральные соли (азот и фосфор). Источником углерода для этого процесса могут быть углекислота, метан и др.

2. ДЕЙСТВИЕ ВОДЫ НА МАТЕРИАЛЫ

При распределении или потреблении воды в результате различных процессов происходит разрушение материалов, с которыми она находится в контакте; наиболее распространенный вид разрушения — коррозия металлов, в особенности стали. Другие виды разрушения включают растворение содержащих известь материалов и разрушение бетона.

Понимание основных процессов и общих для них факторов, которые вызывают разрушение материалов, необходимо для правильного выбора методов борьбы с коррозией: изменение химических свойств воды, применение защитных покрытий, катодная защита или использование более инертных материалов.

2.1. МЕХАНИЗМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ ЖЕЛЕЗА

Чистая вода всегда вызывает коррозию железа, так как между ними нет области термодинамической устойчивости, но кинетика электрохимического процесса коррозии различна в зависимости от того, развивается этот процесс в присутствии кислорода или без него. В последнем случае коррозия вызывается водородом.

2.1.1. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Если какой-либо металл погружен в раствор электролита, имеется тенденция к растворению его положительно заряженных ионов, в то время как сам металл приобретает отрицательный заряд. При этом образуется электрод, потенциал которого может быть определен по уравнению Нернста:

$$E = \frac{RT}{nF} \ln \frac{P}{p} = \frac{RT}{nF} \ln \frac{C}{c},$$

где n — валентность ионов рассматриваемого металла; T — абсолютная температура; R — газовая постоянная, равная 8,31 Дж/(моль·К); P — давление, при котором растворяется металл; p — осмотическое давление раствора; c — активность ионов металла в растворе; C — константа, определяющая концентрацию ионов в металле; F — число Фарадея.

Этот потенциал является стандартным для стандартного раствора данного иона; обозначив его как E_0, можно записать общее уравнение, определяющее электродный потенциал металла при 25 °С:

$$E = E_0 + \frac{0{,}058}{n} \lg c.$$

По аналогии потенциал стандартного водородного электрода может быть выражен следующим образом:

$$E_{\text{н}} = 0{,}058 \lg [\text{H}^+] = -0{,}058\ \text{pH}.$$

На практике стандартные потенциалы могут быть измерены только по отношению к эталонному газовому электроду, называемому стандартным водородным электродом, значение которого принимается равным 0 (табл. 2.1).

Поэтому для железа $E = -0{,}44 + 0{,}029 \lg \text{Fe}^{2+}$. В этой таблице приведена классификация металлов по их потенциалу, который положителен для благородных, а для обычных металлов

ТАБЛИЦА 2.1. ШКАЛА НЕРНСТА СТАНДАРТНЫХ РАВНОВЕСНЫХ ПОТЕНЦИАЛОВ ПО ОТНОШЕНИЮ К СТАНДАРТНОМУ ВОДОРОДНОМУ ЭЛЕКТРОДУ ПРИ 25 °С (МЕТАЛЛ ПОГРУЖЕН В СТАНДАРТНЫЙ РАСТВОР ОДНОЙ ИЗ ЕГО СОЛЕЙ)

Металл	Электродные реакции	Равновесный потенциал, В
Магний	$\text{Mg} = \text{Mg}^{2+} + 2e^-$	−2,34
Бериллий	$\text{Be} = \text{Be}^{2+} + 2e^-$	−1,70
Алюминий	$\text{Al} = \text{Al}^{3+} + 3e^-$	−1,67
Марганец	$\text{Mn} = \text{Mn}^{2+} + 2e^-$	−1,05
Цинк	$\text{Zn} = \text{Zn}^{2+} + 2e^-$	−0,762
Хром	$\text{Cr} = \text{Cr}^{3+} + 3e^-$	−0,71
Железо	$\text{Fe} = \text{Fe}^{2+} + 2e^-$	−0,440
Никель	$\text{Ni} = \text{Ni}^{2+} + 2e^-$	−0,250
Свинец	$\text{Pb} = \text{Pb}^{2+} + 2e^-$	−0,126
Водород	$\text{H}_2 = 2\text{H}^+ + 2e^-$	−0,000 (условно)
Медь	$\text{Cu} = \text{Cu}^{2+} + 2e^-$	+0,345
	$\text{Cu} = \text{Cu}^+ + e^-$	+0,522
Серебро	$\text{Ag} = \text{Ag}^+ + e^-$	+0,800
Платина	$\text{Pt} = \text{Pt}^{2+} + 2e^-$	+1,2 (приблизительно)
Золото	$\text{Au} = \text{Au}^{3+} + 3e^-$	+1,42
	$\text{Au} = \text{Au}^+ + e^-$	+1,68

отрицателен. Указанные потенциалы определены теоретически; измеренные потенциалы могут существенно отличаться от теоретических в зависимости от качества металла и особенно от характера электродных процессов. Например, кроме описанного растворения металла на участках металла с более высоким потенциалом протекает сопряженный процесс. Благодаря этому устанавливается разность потенциалов и образуется электрический ток, который способствует растворению металла электрода или коррозии.

Процесс протекает по-разному в присутствии или отсутствии кислорода.

2.1.2. КОРРОЗИЯ В СРЕДЕ, НЕ СОДЕРЖАЩЕЙ РАСТВОРЕННЫЙ КИСЛОРОД (ВОДОРОДНАЯ КОРРОЗИЯ)

2.1.2.1. Электрохимический механизм. Процесс, сопряженный с растворением металла, заключается в образовании газообразного водорода из ионов H^+, присутствующих в воде. Этот процесс присоединения электронов поддерживает процесс высвобождения электронов на аноде.

Водородная коррозия, ошибочно называемая химической, является в основном электрохимическим процессом, при котором возникают положительный и отрицательный электрические полюса, произвольно названные катодом и анодом, с циркуляцией электрического тока между ними.

На аноде происходит растворение металла или окисление, катод защищен от коррозии. Анодное растворение наблюдается только в том случае, если фактический потенциал металла в электролите ниже, чем потенциал водородного катода, который может образоваться:

на металле с более положительным потенциалом, чем металл анода;

на инородных загрязнениях (оксиды, обрастания);

на неоднородностях кристаллического строения металла, в котором холоднокатаные или холоднотянутые участки становятся анодами по отношению к самому металлу.

Развитие коррозии ограничивается при низких концентрациях H^+-ионов или при насыщении среды ионами Fe^{2+}, которые вызывают образование защитных отложений гидроксида железа (II). Эти защитные отложения смываются при движении электролита; следовательно, водородная коррозия может быть приостановлена только в неподвижной воде.

Так как ионы железа поступают в раствор E_{Fe} повышается, а E_H понижается вследствие выделения газообразного водорода. Реакция прекращается при условии:

$$-0{,}44 + 0{,}029 \lg [Fe^{2+}] = -0{,}058 \text{ pH, т. е. } \lg [Fe^{2+}] = 15{,}1 - 2 \text{ pH}.$$

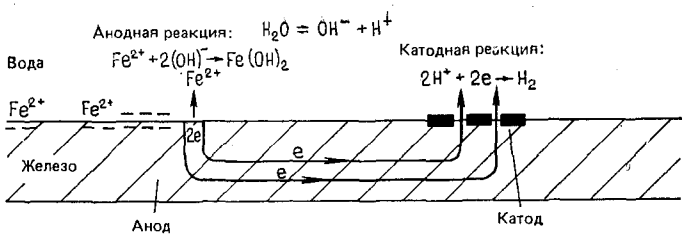


Рис. 2.1. Водородная коррозия, или коррозия в среде, не содержащей растворенный кислород

Рис. 2.2. Равновесный потенциал системы железо — вода в отсутствии кислорода

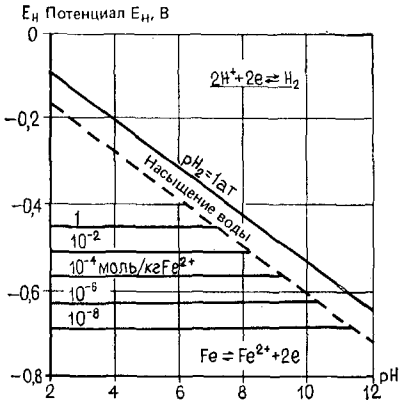
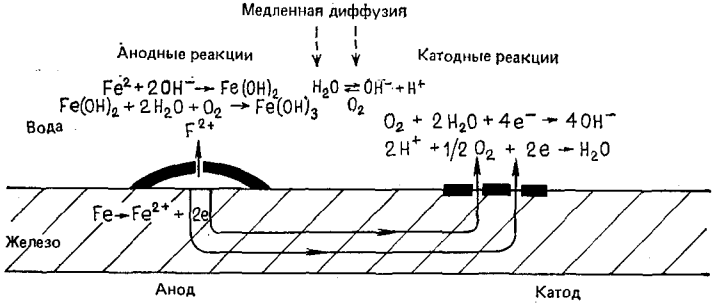


Рис. 2.3. Коррозия в среде, содержащей растворенный кислород



При значении pH менее 10,5, когда растворимость железа составляет 10^{-6} моль/кг и коррозия незначительна, не существует практического диапазона устойчивости, общего для железа и воды.

Обычно «кислотная» коррозия протекает очень интенсивно при низких значениях pH и замедляется, когда концентрация ионов H^+ недостаточна для поддержания катодной реакции и начинается образование защитной пленки.

Приведенная выше диаграмма Нернста может быть использована для расчета равновесного потенциала обоих электродов при различных значениях pH.

Горизонтальные линии характеризуют потенциал железного электрода, независимо от pH, при различных концентрациях ионов Fe^{2+} в воде. Эти концентрации ограничены растворимостью иона, который имеет тенденцию осаждаться в форме гидроксида железа $Fe(OH)_2$.

Описанный процесс в среде, не содержащей кислорода, приводит к разрушению металла, поэтому водородная коррозия проявляется как равномерная коррозия металла в результате одновременного существования большого числа катодов и анодов, способных даже изменять свою полярность.

2.1.3. КИСЛОРОДНАЯ КОРРОЗИЯ

2.1.3.1. Электрохимический механизм. Растворенный в воде кислород обусловливает протекание дополнительного электродного процесса: $O_2+2H_2O+4e^- \rightarrow 4\ OH^-$. Этот электрод абсорбирует электроны и поэтому действует как катод.

В данном случае равновесный потенциал определяется концентрацией ионов OH^-, а следовательно, значением pH, и парциальным давлением кислорода:

$$E' = E_0 - \frac{RT}{F} \ln [OH^-] + \frac{RT}{4F} \ln pO_2.$$

Если потенциал кислородного электрода выше, чем у металлического, то он поддерживает коррозию. Так как этот потенциал выше потенциала водородного электрода более чем на 1 В, о кислороде нельзя сказать, что он «деполяризует» водородный электрод реакцией с H_2, но можно сделать вывод, что кислородная коррозия встречается чаще и область распространения ее более обширна.

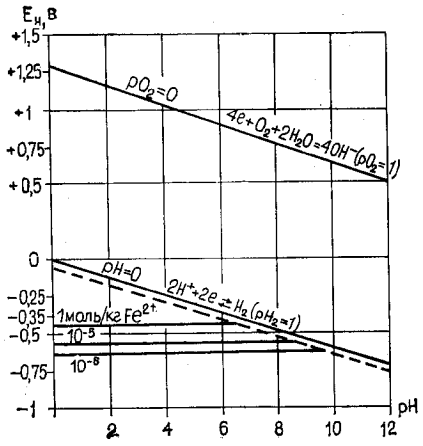


Рис. 2.4. Равновесные потенциалы водородного и кислородного электродов

Описываемый коррозионный процесс протекает при наличии в воде растворенного кислорода; при высоких температурах механизм коррозии будет иным.

Электродный потенциал прямо пропорционален количеству растворенного кислорода, что приводит к очевидному парадоксу. Если участок металла

не доступен для кислорода, он становится анодным и поэтому в большей степени подвержен коррозии, чем остальная поверхность металла, которая защищена кислородом. Этим объясняется вред, причиняемый отложениями всех видов, которые препятствуют доступу кислорода к поверхности металла, что приводит к образованию анодных участков.

На кислородном катоде выделение ионов OH^- вызывает повышение pH воды, по крайней мере, в непосредственной близости от поверхности металла. Кроме того, в присутствии кислорода ионы Fe^{2+} окисляются до Fe^{3+}. Однако гидроксид железа $Fe(OH)_3$ имеет очень низкую растворимость. Поэтому в воде, содержащей кислород, продукты коррозии накапливаются вокруг анода. Они образуют «бугорки», которые представляют собой дополнительный барьер для диффузии кислорода и усиливают анодный характер покрытой поверхности. Этим объясняется, почему кислородная коррозия приводит к образованию сквозных изъязвлений.

2.1.3.2. Коррозия, обусловленная дифференциальной аэрацией. Из рассмотренного механизма коррозии следует, что участки металла, не доступные для растворенного кислорода (винтовая резьба, каверны и трещины и т. д.), являются анодными, а участки, доступные растворенному кислороду, — катодными. Разность потенциалов возникает также между участками металла, на которых в пленке жидкости концентрация растворенного кислорода различна. Следовательно, концепция, постулированная Эвансом, о наличии большого числа микроэлементов, обусловленных дифференциальной аэрацией, может быть распространена на все неоднородности в металле, являющиеся результатом его свойств, конструкции, степени обрастания или просто разности температур.

Распространение коррозии, вызванной дифференциальной аэрацией, в межфазный слой определяется в основном растворимостью кислорода, в частности, скоростью, при которой происходит его диффузия, так как снижение этой скорости ускоряет коррозию. Растворимость кислорода зависит от температуры и парциального давления. Она очень мала при высоких температурах, но никогда не достигает нуля.

Скорость, при которой диффундирует кислород, обусловлена температурой, скоростью циркуляции воды и состоянием поверхности. Эти факторы имеют большое значение в процессе самопроизвольной пассивации металла, который обсуждается ниже.

2.2. ДЕЙСТВИЕ УГЛЕКИСЛОТЫ

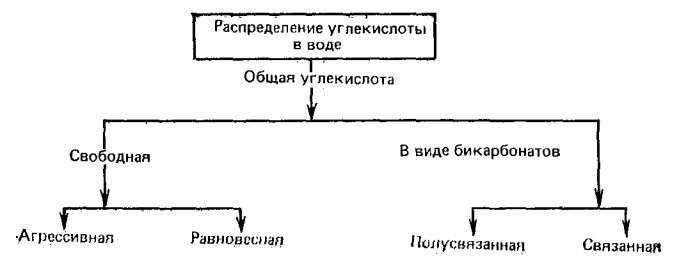
2.2.1. УГЛЕКИСЛОТНОЕ РАВНОВЕСИЕ, АГРЕССИВНОСТЬ ПО ОТНОШЕНИЮ К $CaCO_3$

Природные воды содержат различные растворенные химические вещества, наиболее распространенным из которых является бикарбонат кальция. Равновесие между этой солью и углекислотой определяется сложными законами и любой сдвиг в равновесии может дополнительно к простым электрохимическим реакциям коррозии, характерным для данного металла, инициировать химические реакции, такие как растворение карбоната кальция (агрессивность) или образование карбонатных отложений.

Бикарбонат кальция не известен в твердом состоянии, но может существовать в нестабильном состоянии в водных растворах; он имеет тенденцию терять диоксид углерода и образовывать осадок $CaCO_3$:

$$\underbrace{Ca(HCO_3)_2}_{\text{полусвязанная углекислота}} \rightleftarrows \underbrace{CaCO_3}_{\text{связанная углекислота}} + H_2O + \underbrace{CO_2}_{\text{свободная углекислота}}.$$

Чтобы поддержать бикарбонат кальция в растворе, требуется некоторое количество свободной углекислоты, которая называется равновесной углекислотой и наличие которой в воде сдвигает реакцию осаждения в обратную сторону:



В природной воде может содержаться значительно больше свободной CO_2, чем необходимо для поддержания углекислотного равновесия. Этот избыток агрессивен по отношению к известняку и его значение может быть определено путем испытаний с применением мрамора.

Если содержание свободной CO_2 меньше, чем равновесной CO_2, вода способна к образованию карбонатных отложений.

Эти простые определения общеприняты.

2.2.2. ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О РАВНОВЕСИИ

При изучении агрессивного действия CO_2 рассматривают уравнения, описывающие:

равные электрические заряды

$$H^+ + 2Ca^{2+} + \underbrace{2Mg^{2+} + Na^+ + K^+}_{P^+} \ldots \text{ и т. д.} =$$

$$= OH^- + HCO_3^- + CO_3^{2-} + \underbrace{Cl^- + 2SO_4^{2-}}_{N^-} + \ldots \qquad (1)$$

где P^+ и N^- — суммы катионов и анионов, не входящих в равновесие $CaO - CO_2$;

диссоциацию воды:

$$[H^+]\,[OH^-] = K_0'; \; pK_0' = pK_0 - \varepsilon; \qquad (2)$$

равновесие: вода — H_2CO_3:

$$[H^+]\,[HCO_3^-] = K_1'[H_2CO_3]; \; pK_1' = pK_1 - \varepsilon; \qquad (3)$$

$$[H^+]\,[CO_3^{2-}] = K_2'\,[HCO_3]; \; pK_2' = pK_2 - 2\varepsilon; \qquad (4)$$

произведение растворимости $CaCO_3$ (см. стр. 20):

$$[Ca^{2+}]\,[CO_3^{2-}] = K_s'; \; pK_s' = pK_s - 4\varepsilon; \qquad (5)$$

ε определяется в зависимости от ионной силы раствора μ по уравнению:

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{\mu}}{1 + 1{,}4\sqrt{\mu}}.$$

Ионная сила:

$$10^3\mu = \Sigma\,\frac{1}{2}\,C_n Z_n^2,$$

где C_n — концентрация рассматриваемых ионов (м моль/кг) с валентностью $Z_n e$.

2.2.3. ГРАФИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ

Представляет интерес рассмотреть взаимодействие шести составляющих углекислотного равновесия: H^+, OH^-, CO_3^{2-}, HCO_3^-, Ca^{2+} и H_2CO_3 и графическое выражение этого взаимодействия.

В качестве координат принимают любые два основных компонента и выбирают диаграмму, обеспечивающую простое построение кривых, которые характеризуют различные составляющие углекислотного равновесия воды.

Кривые (pH, HCO_3^-, CO_3^{2-} и H_2CO_3) рассчитывают по основным уравнениям. Полученная диаграмма справедлива для группы вод с постоянными N^- и P^+ и переменной концентрацией углекислотных составляющих и кальция.

Имеется большое число диаграмм с использованием различных переменных. Некоторые из них приведены ниже.

2.2.3.1. Метод Тильманса (1930 г.) основан на изучении чистых растворов бикарбоната кальция в присутствии CO_2 и позволяет определить количество равновесной CO_2 через полусвязанную CO_2 в форме бикарбоната. Он был использован Гюйгесом при построении диаграммы, в которой для представления семейства кривых $[Ca^{2+}]=\text{const}$ и $[Ca^{2+}]-ОЩ=\text{const}$ используется та же система координат. На практике эта диаграмма может быть применена для определения равновесного состояния природных вод и мер, необходимых для предотвращения их агрессивного действия или образования карбонатных отложений.

2.2.3.2. Метод Ланжелье и диаграмма Гувера (1936) (см. с. 911). Ланжелье рассчитывал величину pH равновесного насыщения воды карбонатом кальция — pH_s по четырем параметрам:

содержанию кальция $[Ca^{2+}]$, общей щелочности $[HCO_3^-]$;

общему солесодержанию, обусловливающему влияние ионной силы раствора на концентрационные константы диссоциации K_2^1 и K_s^1;

температуре, влияющей на pK_s^1 и pK_2^1 (см. с. 20).

Подставляя значение $[CO_3^{2-}]$, полученное из уравнения (5), в уравнение (4) для воды в состоянии равновесия имеем:

$$[H^+]=\frac{K_2^1}{K_s^1}\,[HCO_3^-][Ca^{2+}]$$

и

$$pH_s = pK_2' - pK_s' - \lg[Ca^{2+}] - \lg[HCO_3^-].$$

Ланжелье предложил ввести понятие индекса насыщения воды карбонатом кальция I_s, равного разности между измеренным значением pH данной воды и расчетным значением pH_s: $I_s = pH - pH_s$.

Если $pH < pH_s$, I_s отрицателен и вода агрессивна. Если $pH > pH_s$, I_s положителен и вода способна образовывать карбонатные отложения.

В диаграмме Ланжелье концентрация бикарбонатного иона $[HCO_3^-]$ заменена щелочностью, выраженной по $CaCO_3$, а ионная сила раствора — концентрацией растворенных солей (плотным остатком). Концентрации выражены в мг/л. Следует отметить, что pH_s представляет собой теоретическое значение pH, отличающееся от того, которое получается при состоянии углекислотного равновесия в реальных условиях из-за изменения других параметров.

Чтобы рассчитать реальное значение pH равновесного состояния после обработки воды, необходимо сначала определить изменения значений параметров, влияющих на углекислотное равновесие в результате этой обработки.

Диаграмма Гувера. Так как диаграмма Ланжелье сложна для интерпретации, Гувер перестроил ее в более простую диаграмму с параллельными осями. Это графическое решение только качественно учитывает солесодержание и температуру воды, и поэтому не может быть использовано для определения доз нейтрализующих реагентов.

2.2.3.3. Метод Галлопэ. Галлопэ предложил графический метод определения агрессивного действия воды на $CaCO_3$ и расчета доз нейтрализующих реагентов путем выражения величины pH_s через логарифмы щелочности и кальциевой жесткости:

$$pH_s = \lg K_s' - \lg K_2^1 - \lg 2[HCO_3^-] - \lg[Ca^{2+}] + \lg p,$$

где $p = 1 + \frac{2K_2^1}{[H^+]}$.

Диаграмма Галлопэ и Дюбена (см. рис. 2.8) построена в системе координат: логарифм щелочности и pH воды. Поэтому концентрация свободного диоксида углерода и pH представлены двумя группами параллельных прямых.

Концентрация свободного диоксида углерода может быть определена, если известны pH и щелочность воды. Диаграмма содержит две системы кривых, характеризующих растворение CO_2 и нейтрализацию известью и $CaCO_3$.

Хотя в диаграмме введены понятия жесткости, обусловленной известью, и общей жесткости, этот метод, в котором не учитывается или солесодержание, или щелочность воды, применим в основном к водам со средним солесодержанием.

2.2.3.4. Диаграмма Франкуина и Мареко применяется для определения агрессивного действия бикарбонатных вод с низким солесодержанием. В качестве переменной принята общая щелочность воды ОЩ, а в качестве функции — сумма свободной и полусвязанной CO_2. Кривые для постоянных значений pH и постоянных концентраций CO_2 представляют собой прямые линии. Кривая равновесного состояния справедлива для значений pH ниже 10.

2.2.3.5. Метод Леграна и Пуарье. Легран и Пуарье приняли систему координат: концентрация кальция $[Ca^{2+}]$ — общее содержание CO_2. Кривая равновесного состояния построена для данного солесодержания, которое определяется соединениями, не входящими в уравнение углекислотного равновесия. Этот метод может быть использован для определения условий равновесного состояния для данной воды, условий реагентной обработки и значений показателей качества воды, получающихся в результате обработки.

2.3. ОБРАЗОВАНИЕ ЗАЩИТНЫХ ПЛЕНОК И ПАССИВАЦИЯ

Развитие коррозии может быть ограничено образованием естественных или искусственно создаваемых защитных пленок.

Естественные защитные пленки образуются под действием веществ, содержащихся в воде, или при изменении температуры. Для создания искусственной защитной пленки используют ингибиторы коррозии или применяют катодную защиту.

2.3.1. ОБРАЗОВАНИЕ ЕСТЕСТВЕННЫХ ЗАЩИТНЫХ ПЛЕНОК

Этот процесс торможения коррозии связан с присутствием ионов OH^-, поэтому он протекает при нейтральных и щелочных значениях pH.

Вблизи граничного слоя растворимость ионов Fe^{2+} и значения pH могут совершенно отличаться от соответствующих значений в самой воде; эта разница особенно заметна в неподвижной воде или при ее очень медленном движении. В результате на катодных участках исчезают ионы H^+ и щелочность повышается; избыток ионов OH^- связывается ионами Fe^{2+} в гидроксид железа $Fe(OH)_2$, который образует равномерную пленку на катодных или анодных участках.

Гидроксид железа нестабилен. В зависимости от температуры и химического состава среды он подвергается превращениям, которые определяют защитные свойства образованной пленки.

2.3.1.1. Влияние кальциевой щелочности (смешанная пленка Тильманса) в воде, содержащей кислород. Бикарбонатно-кальциевая вода, которая содержит достаточно кислорода и находится в состоянии углекислотного равновесия, в системах холодного водоснабжения образует естественную защитную пленку на катодных участках; этот слой, известный под названием пленки Тильманса, основан на смешанном осаждении карбоната кальция и окислов железа. Процесс образования пленки Тильманса протекает в диапазоне значений pH=7—8,5.

Если к катодным участкам диффундируют большие количества кислорода, гидроксид железа (II), не обладающий защитными свойствами, быстро окисляется до гидроксида Fe^{3+}. При содержании в воде значительного количества бикарбоната кальция происходит одновременное локальное образование $CaCO_3$, который кристаллизуется совместно с различными оксидами железа. При этом образуется естественная защитная пленка, характерная для многих систем, распределяющих поверхностные или предварительно аэрированные подземные воды.

Защитная пленка образуется при соблюдении трех условий:

в воде содержится не менее 4—5 мг/л растворенного кислорода;

содержание свободной углекислоты соответствует углекислотному равновесию;

бикарбонатно-кальциевая щелочность исходной воды достаточна, чтобы превысить произведение растворимости карбоната кальция на катодных участках (1,4—2,2 мг·экв/л).

Если вода не содержит растворенного кислорода, развивается кислотная коррозия, интенсивность которой зависит от концентрации ионов H^+, CO_2 и солесодержания.

Возможность образования защитной пленки оценивают путем определения индекса стабильности Ризнера, который широко используется в исследованиях по обработке охлаждающей воды в промышленности. Он был получен при экспериментах на воде, содержащей бикарбонат кальция. Индекс Ризнера можно использовать для эмпирического определения способности воды, содержащей кислород, вызывать коррозию или образовывать отложения.

Индекс Ризнера вычисляют по формуле

$$I_R = 2pH_s - pH,$$

где pH_s — теоретическое значение pH насыщения воды карбонатом кальция, рассчитанное по диаграмме Ланжелье и Гувера; pH — значение pH воды, измеренное при соответствующей температуре.

В диапазоне температур 0—60 °С при различных положительных значениях индекса могут происходить следующие процессы:

Индекс	Процессы
4—5	Интенсивное образование карбонатных отложений
5—6	Слабое образование отложений
6—7	Равновесие или слабая коррозия
7—7,5	Интенсивная коррозия
7,5—8,5	

2.3.1.2. Магнетитовая пленка. При температуре выше 100 °С как в присутствии кислорода, так и без него гидроксид железа (II) способен превращаться в промежуточный продукт окисления — магнетит (F_3O_4):

$$3Fe(OH)_2 \rightarrow Fe_3O_4 + H_2 + 2H_2O.$$

Образование магнетитовой пленки начинается при 100 °С и завершается при 200 °С. Она обладает высокой стойкостью и не растворяется ни при нейтральных, но даже при слабокислых значениях pH.

Если вода очень чистая и не содержит кислорода, то при температуре ниже 200—250 °С следует повышать pH в обратной зависимости от температуры; при температуре выше 200—250 °С процесс коррозии больше не зависит от pH, по меньшей мере при значениях pH, выше нейтральных.

2.3.2. ИНГИБИРОВАНИЕ И ПАССИВАЦИЯ

За исключением двух рассмотренных случаев сталь во всех водах подвергается коррозии. Появление коррозии может быть приостановлено путем ингибирования, усиливающего поляризацию электродов в результате добавления к воде некоторых растворимых соединений, что приводит к осаждению на металле нерастворимых соединений, буферному действию, снижающему кислотность возле анодных участков (уже описанный случай бикарбонатно-кальциевых вод) и образованию изолирующей мономолекулярной пленки при адсорбции органических ингибиторов.

Некоторые из этих механизмов могут действовать синергично. Термин «ингибирование» относится к раствору, в который погружен металл, а термин «пассивация» описывает условие, при котором металл покрывается защитной некорродирующей пленкой.

Кислород может содействовать пассивации, так как не только способствует образованию оксидов, но и снижает активность анионов, которые являются катализаторами коррозии.

Эффективность ингибирования зависит от температуры и удельного сопротивления воды. Ингибирование затруднено в горячей воде по сравнению с холодной и его эффективность уменьшается с уменьшением удельного сопротивления воды. Поэтому обработка вод, содержащих хлориды, и солоноватых вод ингибиторами коррозии малоэффективна.

Для борьбы с кислотной коррозией применяют ингибиторы с физическим или адсорбционным механизмом действия, а при кислородной коррозии — химические ингибиторы (см. гл. 14).

2.3.3. СПОСОБЫ ЗАЩИТЫ ОТ КОРРОЗИИ

На диаграмме Пурбэ показаны различные зоны коррозии, пассивации и иммунности для стали (рис. 2.5).

Таким образом, коррозия может быть предотвращена несколькими способами:

- пассивацией поверхности путем создания окислительной или щелочной среды (это область естественной пассивации);
- введением в воду ингибиторов, которые замедляют коррозионный процесс, «поляризуя» электроды;
- повышением pH, что достигается нейтрализацией или подщелачиванием до значений pH выше 10,5 (это обычный процесс при подготовке воды для котлов низкого давления и в некоторых других случаях);
- снижением электродного потенциала до значений, не превышающих —0,58 В. В этом состоит метод катодной защиты, который применяют для защиты проложенных в земле труб или

оборудования, используемого в морской воде (иммунизация стали);
- химической (см. стр. 397) и физической изоляцией (покрытия).

2.3.4. КАТОДНАЯ ЗАЩИТА

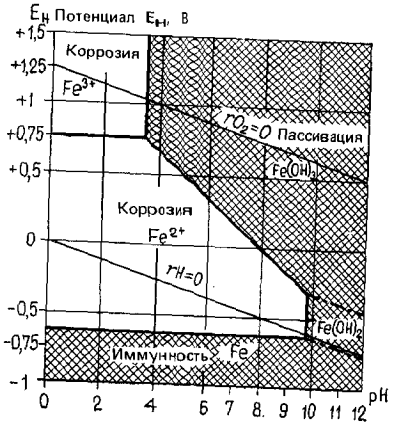


Рис. 2.5. Диаграмма Пурбэ

При использовании этого метода защиты металлическая конструкция становится полностью катодной и не подвергается коррозии, если поддерживаемый отрицательный электрический потенциал достаточен для полной поляризации защищаемой поверхности. Катодная защита может быть применена, когда электролит неоднородный (концентрационные элементы в воде, содержащей различные количества солей, и в почвах с переменным количеством влаги) или когда в контакте с одним электролитом находятся несколько металлов. Считают, что катодная защита эффективна при значениях наложенного потенциала от —0,85 до —1 В.

Плотность тока зависит от качества покрытия на защищаемом металле и приблизительно составляет:

60 мА/м² для неизолированной решетки, погруженной в морскую воду;

5 мА/м² для решетки с эпоксидным покрытием;

0,1 мА/м² для трубы с полимерным покрытием, уложенной во влажный грунт с низкой электропроводностью.

При катодной защите в морской воде, однако, принимается расчетная плотность тока 80 мА/м², при которой разрушение покрытий может происходить в течение длительного времени.

Существуют два метода катодной защиты: к первому относится применение активных расходуемых анодов из магния или алюминия. В этом случае присоединение металла-протектора, который имеет бóльший отрицательный электрический потенциал, чем сталь, приводит к возникновению внутреннего гальванического тока.

Магний, характеризующийся разностью электролитических потенциалов со сталью 1,8 В, применяют в воде с высоким удельным сопротивлением при силе тока в несколько ампер со скоростью растворения магния около 10 кг/А·год. Алюминий, который имеет разность электролитических потенциалов со сталью 1,1 В, используют в водах с высокой электрической про-

водимостью, таких как морская вода, при высокой силе тока и скорости растворения около 4 кг/А·год.

При другом методе защиты используют наложение внешней э д с и установление внешнего электрического тока. Заземленный анод выполняют из некорродирующего материала (например, ферросилиция или платинированного титана). Обычно принимаемые значения плотности тока для таких анодов составляют соответственно 0,1 и 10 А/дм². Разности потенциалов в пресной воде принимают от 5 до 10 В, а в морской воде — от 1,5 до 2 В.

Точки заземления и дренажа тока должны быть распределены очень тщательно.

Расходуемые аноды могут быть использованы только для защиты конструкций простой формы с малой площадью поверхности или когда катодная защита не может быть применена по конструктивным причинам (например, в отстойниках со скребковыми механизмами).

2.4. ВЛИЯНИЕ ВТОРИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА КОРРОЗИЮ

Кроме двух основных факторов, определяющих условия развития коррозии (углекислотного равновесия и концентрации кислорода), на вид и скорость коррозии оказывают влияние содержание в воде растворенных солей (в основном хлоридов), изменение температуры, концентрация в воде взвешенных частиц и присутствие в ней микроорганизмов.

2.4.1. СОЛЕСОДЕРЖАНИЕ ВОДЫ (СУЛЬФАТЫ И Т. Д.)

В очень чистой обессоленной воде (с удельным сопротивлением 5 МОм·см) в присутствии кислорода скорость коррозии железа незначительна. Растворение очень малого количества солей в воде обусловливает две причины усиления коррозии.

Общее солесодержание воды увеличивает ее электрическую проводимость и, следовательно, понижает сопротивление коррозионному току. В этом случае коррозия может начаться при наличии в воде ничтожно малых концентраций хлоридов и концентрации сульфатов менее 1 мг/л. Коррозия стимулируется ионами Cl^-, Br^-, SO_4^{2-} и NO_3^-.

Предложенная Эвансом теория разрушения пассивирующей пленки хлоридами открывает путь к развитию более широкой гипотезы, в соответствии с которой в присутствии некоторых анионов перенапряжение слабее и растворение стали требует меньше энергии. Согласно теории, адсорбция этих анионов на анодных участках способствует миграции железа к межфазной границе. Причем галоиды в большей степени, чем анионы с

большей атомной массой или гидратированные анионы, усиливают процесс миграции.

Хлориды оказывают очень заметное влияние на развитие коррозии. В начальной стадии концентрация на анодном участке ионов Cl^-, принесенных током, возрастает, и в то же время появляются ионы H^+ в результате осаждения ионов OH^- в виде гидрозакиси железа. Это приводит к образованию высоких местных концентраций ионов H^+ и Cl^-, что мешает местному осаждению гидроксидов.

Увеличение концентрации хлоридов в воде повышает вероятность образования большого числа микроанодов, что приводит к расширению общей коррозии и питтинга. Это одно из объяснений появления питтинга вдоль линии потока внутри трубы благодаря смещению местных концентраций HCl.

Одним из основных факторов, способствующих развитию коррозии, которая обусловлена повышением концентрации хлоридов, является соотношение между растворимостью кислорода и содержанием NaCl в воде. Концентрация кислорода в соленой и солоноватой воде практически постоянна при солесодержании до 5 г/л (по NaCl) и составляет около 8 мг/л. В диапазоне солесодержания от 5 до 310 г/л, что соответствует пределу растворимости NaCl, растворимость кислорода уменьшается до 5 мг/л при 100 г/л NaCl и до 1 мг/л при 310 г/л NaCl.

Хач показал, что коррозионная активность воды возрастает до концентрации NaCl 10 г/л и затем уменьшается аналогично снижению растворимости кислорода. Это означает, что солоноватые воды более коррозионны, чем рассолы. При определенных значениях pH и общей щелочности природные солоноватые воды могут иметь малую коррозионную активность, но очищенные солоноватые воды остаются коррозионными при pH ниже 10.

Сульфаты влияют на коррозию следующим образом:

непосредственно, увеличивая солесодержание и снижая удельное сопротивление воды;

косвенно, включаясь в цикл сульфатовосстанавливающих бактерий и в расширение биологической коррозии;

участвуют в процессе разрушения бетона (см. с. 53).

OH^- — *ионы, хроматы и силикаты,* напротив, способствуют образованию защитной пленки и уменьшению коррозии.

Влияние ионов Cu^{2+}: медь в растворе при концентрации менее 1 мг/л может значительно увеличить скорость коррозии в результате электрохимического осаждения меди на катодных участках.

2.4.2. ТЕМПЕРАТУРА ВОДЫ, СОДЕРЖАЩЕЙ РАСТВОРЕННЫЙ КИСЛОРОД

При температуре ниже 60 °С в закрытом сосуде при нагревании нарушается стабильность воды и образуются карбонатные отложения с последующим восстановлением углекислотного равновесия, но в то же время увеличивается коррозионная активность воды по отношению к стали.

Обработка воды с целью получения пленки карбоната кальция обеспечивает некоторую защиту.

Наоборот, когда вода нагрета и после образования осадка $CaCO_3$ восстановлено углекислотное равновесие, охлаждение воды до начальной температуры делает ее нестабильной и агрессивной. Такая вода имеет более высокую коррозионную активность, а отсутствие отложений $CaCO_3$ способствует расширению коррозии.

В открытых производственных системах под действием химических факторов протекают те же процессы, что и в закрытом сосуде, но углекислотное равновесие может быть сдвинуто выделением CO_2, что увеличивает тенденцию к образованию карбонатных отложений.

При воздействии электрохимических факторов одновременное существование горячих зон (где pH ниже) и холодных участков (где pH выше) приводит к образованию различных местных концентраций H^+ и создает гетерогенную поверхность с горячими анодными и холодными катодными участками. Разность температур 20 °С может привести к разности потенциалов в 55 мВ. Образование газовых включений CO_2 и пленок менее соленой конденсационной воды на выступах поверхности приводит к образованию анодных участков.

При температуре выше 60 °С доминирует выделение кислорода, что способствует образованию концентрационных элементов дифференциальной аэрации, которые добавляются к уже имеющимся элементам, обусловливая образование более высокого потенциала. В этих условиях коррозия значительно усиливается.

По этой причине системы горячего водоснабжения зданий значительно труднее защитить от коррозии, чем производственные системы, где температурные градиенты обычно в 4—6 раз меньше, а средние температуры ниже 45 °С (за исключением участков с сильным нагревом).

2.4.3. МИКРООРГАНИЗМЫ (СМ. БАКТЕРИАЛЬНОЕ ОКИСЛЕНИЕ — ВОССТАНОВЛЕНИЕ)

Биологическая коррозия представляет собой вторичную форму коррозии и часто выражается в образовании твердых наростов или бугорков, расположенных очень близко друг к

другу. Они вызывают значительные обрастания и даже питтинговую коррозию под ними, что может привести к возникновению свищей. Эти обрастания состоят из скоплений нитеобразных железобактерий, покрытых снаружи частично дегидратированным оксидом железа, и нередко содержат карбонат кальция. Обычно бугорки бывают полыми, причем в середине находится жидкая масса черного цвета, которая быстро окисляется на воздухе.

Присутствие сульфида железа (выделение H_2S) можно определить быстрым качественным анализом с сильной кислотой.

Активной бактериальной средой служат железобактерии, автотрофные и сульфатвосстанавливающие бактерии.

Железобактерии типа Leptothrix, Crenothrix и Gallionella живут в аэробной среде и синтезируют энергию, потребляя двухвалентное железо и превращая его в трехвалентное железо (см. гл. 28, с. 1018). Они ускоряют процесс медленного окисления с помощью секреции ферментов, лишают среду кислорода и деполяризуют аноды. Таким образом, они способствуют развитию коррозии.

Автотрофные бактерии рода Hydrogenomonas синтезируют энергию окислением водорода на катоде:

$$4Fe \rightarrow 4Fe^{2+} + 8e^-.$$

Так как их действие деполяризует катод, они способствуют развитию коррозии.

Сульфатвосстанавливающие бактерии вида Desulfovibrio desulfuricans — факультативные анаэробы, которые могут временно выдерживать насыщение воды кислородом, что объясняет их присутствие в охлаждающих системах. Они являются автотрофами. Восстанавливая сульфаты, эти бактерии способствуют образованию сероводорода из водорода, выделяющегося на катодных участках:

$$SO_4^{2-} M^{2+} + 4H_2 \rightarrow S^{2-} M^{2+} + 4H_2O.$$

Сульфиды, образующиеся при восстановлении сульфатов, осаждают ионы двухвалентного железа в форме черного сульфида железа.

На практике имеют место несколько реакций:

деполяризация катода сульфатвосстанавливающими бактериями

$$SO_4^{2-} + M^{2+} + 4H_2 \rightarrow S^{2-} + M^{2+} + 4H_2O,$$

где M^{2+} — щелочной или щелочноземельный металл в концентрациях, соответствующих концентрации сульфат-иона;

образование различных коррозионных продуктов, в частности

$$S^{2-} + Fe^{2+} \rightarrow FeS,$$

$$3Fe^{2+} + 6OH^- \rightarrow 3Fe(OH)_2$$

и в общем виде

$$4Fe^{2+} + SO_4^{2-} + 2H+ + 2H_2O \rightarrow 3Fe(OH)_2 + FeS.$$

Биологическая коррозия почти всегда следует за электрохимической коррозией, которую она лишь ускоряет потреблением водорода. Развитию биологической коррозии под действием сульфатвосстанавливающих бактерий благоприятствуют следующие условия: анаэробная среда; pH=5,5—8,5; наличие сульфатов; содержание неорганических (PO_4^{3-} и Fe^{2+}), а также органических веществ, которые благоприятствуют размножению бактерий, и оптимальная для развития бактерий температура среды 30—40 °С.

Потребление кислорода на поверхности бугорков уменьшает количество кислорода, диффундирующего внутрь каждого бугорка, в котором создаются анаэробные условия, благоприятствующие росту бактерий-восстановителей.

Образование сульфидов приводит как к осаждению сульфида железа, так и к восстановлению гидроксида железа:

$$2Fe(OH)_3 + 3H_2S \rightarrow 2FeS + S + 6H_2O.$$

Внутренний объем бугорков уменьшается, поскольку **гидроксид железа превращается в более плотный сульфид железа.** Поэтому биологическая коррозия состоит в упрочнении ассоциаций, образованных семействами бактерий, упомянутых выше. Наличие сульфатвосстанавливающих бактерий выявляется анализом отложений и наличием серы, а не внешним видом бугорков.

2.4.4. СОСТОЯНИЕ ПОВЕРХНОСТИ И КАЧЕСТВО ВОДЫ

Коррозионные отложения в старых системах или отложения, возникающие от подачи плохо осветленной воды, могут вызвать коррозию вследствие двух причин: под отложениями возникают пары дифференциальной аэрации, которые могут создать анодные участки, либо образуются зоны, где развиваются различные штаммы бактерий и происходят реакции восстановления и депассивации. Нержавеющие стали особенно подвержены этому процессу.

2.4.5. ЗНАЧЕНИЕ pH

При повышении pH значительно понижается растворимость ионов Fe^{2+} и в результате образуется защитная пленка гидроксида железа (II) (и других уже названных оксидов); это приводит к доминирующему увеличению площади катодных участков и резкому уменьшению площади анодных участков. С уменьшением площади анодных участков плотность коррозионного тока на них возрастает.

Риск сквозных коррозионных поражений в присутствии кислорода возрастает, когда значение pH приближается к 10, т. е. значению, при котором, как это было показано выше, коррозия уменьшается; в большинстве природных или очищенных вод коррозия прекращается при pH=10,5.

2.4.6. СКОРОСТЬ ПОТОКА

Это очень важный, но сложный фактор, который включает физические, механические и электрохимические явления. Под влиянием движения потока происходит процесс разрушения стали, который можно подразделить на три группы: кавитацию, абразивную эрозию, эрозию — коррозию.

Кавитация является результатом появления зон с местным гидростатическим давлением, выше и ниже упругости паров воды, обусловливающим выделение пузырьков пара и захлопывание их при очень высоком давлении, что приводит к неравномерному изъязвлению твердого металла.

Абразивная эрозия происходит под действием кинетической энергии частиц песка и других веществ, содержащихся в воде, которые вызывают непрерывное разрушение защитного слоя в результате равномерного истирания твердого материала. Хомиг считает, что этот процесс является одновременно механическим и электрохимическим.

Эрозия — коррозия происходит из-за нарушения условий, при которых образуется сплошная пленка, так как кислород диффундирует при скорости, зависящей от скорости потока воды. Механизм этого типа коррозии исключительно электрохимический: в отсутствии кислорода защитная пленка гидроксида железа (II), обусловленная насыщением граничного слоя ионами Fe^{2+}, не может образовываться при высоких скоростях потока. В присутствии кислорода процесс усложняется влиянием скорости диффузии кислорода и возможностью образования защитной пленки гидроксида железа. При повышении скорости потока наблюдается появление зоны кислотной коррозии с последующим усилением пассивации, и в результате защитная пленка не образуется.

2.5. КОРРОЗИЯ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

2.5.1. ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Нержавеющая сталь обычно представляет собой железохромистый сплав, содержащий более 11,5% хрома. В зависимости от кристаллической структуры нержавеющие стали делятся на четыре категории: мартенситные, ферритные, аустенитные и аустенитно-ферритные.

Мартенситные стали имеют кубическую кристаллическую структуру. Их редко используют при изготовлении котлов, так как они плохо штампуются и свариваются. Эти стали обычно содержат 13% хрома и менее 0,1% углерода.

Ферритные стали имеют объемно-центрированную кубическую кристаллическую решетку. Они характеризуются высоким содержанием хрома и стойкостью к окислению при высоких температурах, особенно в атмосфере серы.

Аустенитные стали имеют гранецентрированную кубическую кристаллическую решетку. Содержат более 16% хрома, более 6% никеля, который способствует аустенитной кристаллизации. Эти сорта нержавеющих сталей обладают наибольшей коррозионной стойкостью и поэтому представляют особый интерес для технологии обработки воды. Их свойства зависят от содержания углерода, хрома и никеля.

Аустенитно-ферритные стали. Повышение содержания хрома приводит к образованию ферритной структуры (альфа-стабилизирующий элемент), в то время как повышение содержания никеля ведет к образованию аустенитной структуры (гамма-стабилизирующий элемент). Следовательно, аустенитные стали содержат некоторое количество феррита.

Аустенитно-ферритные стали имеют бо́льшую механическую прочность, чем аустенитные, и стойки по отношению к межкристаллитной коррозии и коррозии под напряжением. Составы основных аустенитных и аустенитно-ферритных нержавеющих сталей, применяемых во Франции, приведены в табл. 2.2.

Имеются более высокосортные стали, такие как «хастеллой» (выпускает фирма «Юнион Карбайд»), «инколой» (изготовляет фирма «Интернэйшнл никель») и «монель» (выпускает фирма «Виджин»), которые используются только для специальных целей.

ТАБЛИЦА 2.2

Французский стандарт	Структура	Состав, %					Эквивалент		Торговые марки	
		углерод	хром	никель	молибден	медь	американский	немецкий	«Ugine»	«Creusot—Loire»
Z6CN 18—09	Аустенитная	⩽0,08	18—19	9	—	—	AISI304	X5CrNi 18—09	NS21AS	
Z2CN 18—10	Аустенитная	⩽0,03	18—19	9—10	—	—	AISI304L	X2CrNi 18—09	NS22S	
Z6CND 17—12	Аустенитная	⩽0,08	17	11—12	⩾2	—	AISI316	X5CrNi Mo18—12	NSM21	
Z2CND 17—13	Аустенитная	⩽0,03	17	12—13	⩾2 —5	—	AISI316L	X2CrNi Mo18—12	NSM22S	
Z1CNDU 25—20	Аустенитная	⩽0,02	19—22	26—27	4—4,8	1—2	—	—	—	«Уранус B6»
Z5CNDU 21—08	Аустенитно-ферритная	⩽0,06	20—22	6—9	2—3	1—2	—	—	—	«Уранус B50»

2.5.2. КОРРОЗИЯ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ В ЖИДКОЙ СРЕДЕ

В сплаве с хромом железо становится пассивным во многих типах сред. Степень коррозионной стойкости сплава зависит от устойчивости его пассивации, которая максимальна в окислительной среде, но может исчезнуть в восстановительной среде.

Пассивация происходит за счет образования тонкой пленки оксида хрома на поверхности металла. Любое случайное разрушение этой пленки приведет к коррозии. Исключение составляет сильно окислительная среда, когда пленка восстанавливается автоматически (устойчивая пассивность). Добавка никеля повышает коррозионную стойкость в слабо окислительных средах и в средах, не обладающих окислительными свойствами, а добавка молибдена повышает стойкость в присутствии восстановителей или ионов галогенов (хлориды, бромиды, иодиды).

Однако нержавеющие стали в результате явления, известного под названием «перепассивация», могут корродировать в сильно окислительных средах, таких как азотная кислота, содержащая шестивалентный хром.

Диапазон пассивности может быть расширен добавкой к нержавеющим сталям некоторых элементов. Например добавка кремния способна предотвратить перепассивацию, а добавка меди улучшает коррозионную устойчивость в серной кислоте.

2.5.3. ВИДЫ КОРРОЗИИ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

2.5.3.1. Общая коррозия. Как и все металлы, нержавеющие стали в некоторых случаях могут подвергаться коррозии равномерно по всей поверхности. Если среда не обладает значительными окислительными свойствами, защитная пленка на поверхности металла может в конце концов исчезнуть, что приводит к общей коррозии (неустойчивая пассивность). Более того, состояние поверхности металла влияет на природу его пассивности; коррозионная стойкость максимальна, если поверхность металла не загрязнена частицами железа или различными отложениями.

2.5.3.2. Межкристаллитная коррозия нержавеющей стали происходит в основном возле сварных швов. Она может возникнуть также в результате горячей штамповки или термической обработки металла. Это явление обусловлено локальным снижением содержания хрома при анодном растворении карбида хрома, который выделяется по границам зерен возле сварных швов при температурах 400—800 °С. В кислой среде сцепление зерен при этом нарушается и металл становится хрупким.

Развитие межкристаллитной коррозии, которая характерна для аустенитных сталей, можно предотвратить двумя способами: снижением содержания углерода в стали до 0,03% (чтобы

ограничить образование карбида хрома) и применением стали, стабилизированной ниобием или титаном, которые с углеродом образуют устойчивые карбиды.

2.5.3.3. Питтинг. Растворенный кислород обычно способствует пассивации нержавеющей стали за исключением случаев, когда происходит питтинговая коррозия (при наличии в среде хлоридов и бромидов. Этот очень распространенный и очень опасный вид коррозии приводит к образованию сквозных изъязвлений, которые могут быть почти невидимы на поверхности. Вероятность питтинговой коррозии нержавеющей стали под действием растворов, содержащих хлориды, возрастает с увеличением количества воздуха в растворе. Молибденсодержащие нержавеющие стали с высоким содержанием хрома и низким содержанием углерода (например, Z2CND13) относительно стойки к этому виду коррозии.

Общие закономерности возникновения питтинговой коррозии трудно установить, так как они зависят от многих факторов: pH среды, концентрации кислорода, температуры, солесодержания, количества взвешенных веществ и т. д. В некоторых случаях для предотвращения питтинговой коррозии могут быть применены высокосортные сплавы, такие как уранус (Uranus).

2.5.3.4. Язвенная коррозия. Существует очень мало металлов, не подвергающихся этой разновидности коррозии. Она развивается в застойных зонах, где затруднена или полностью отсутствует диффузия кислорода. Особенно часто язвенная коррозия обнаруживается под слоем отложений, оксидов, биологических обрастаний, под неметаллическими, негерметичными соединениями и т. д.

Язвенная коррозия нержавеющих сталей представляет собой сложный процесс. Он инициируется дифференциальной аэрацией, ведущей к образованию маленьких ячеек, в которых удерживаются продукты коррозии. Если коррозионной средой является, например, вода, содержащая кислород, которая практически нейтральна, но содержит хлориды, гидролиз первичных продуктов коррозии в ячейках приведет к образованию соляной кислоты, которая, достигнув некоторой критической концентрации, вызовет развитие язвенной коррозии. Поэтому язвенная коррозия характеризуется инкубационным периодом, который может продолжаться несколько месяцев. Но если процесс коррозии начался, он развивается очень быстро. В таких случаях коррозия усиливается образованием локальных электрохимических элементов между пассивным и активным металлом, которые быстро разрушают пассивирующую пленку.

Если продукты коррозии смываются водой во время инкубационного периода, процесс язвенной коррозии прекращается полностью.

Наличие никеля и молибдена в стали увеличивает продолжительность инкубационного периода и, таким образом, повышается вероятность того, что процесс будет приостановлен в этот период. Однако, если инкубационный период закончился и начался процесс язвенной коррозии, его скорость для стали с высоким содержанием никеля и молибдена будет столь же велика, как и для стали с меньшим содержанием этих компонентов.

Чтобы предотвратить возникновение язвенной коррозии, необходимо исключить условия, которые способствуют развитию дифференциальной аэрации. Для этой цели должны быть исключены все изменения концентрации кислорода в среде. Однако было бы неправильно предполагать, что путем насыщения среды кислородом и перемешиванием можно добиться состояния насыщения кислородом в трудно доступных зонах.

Для предотвращения образования отложений следует поддерживать достаточно высокие скорости движения воды, если возможно более 3 м/с, а сооружения должны быть запроектированы таким образом, чтобы при эксплуатации не возникали застойные зоны. Если это не удается осуществить, следует предусмотреть возможность периодического дренирования и очистки таких зон.

2.5.3.5. Коррозия под напряжением может происходить в аустенитных сталях, подвергающихся механическим напряжениям, которые или являются остаточными после предварительной обработки (штамповки, сварки), или возникают в процессе эксплуатации. Коррозия под напряжением может развиваться и в некоррозионной среде, но активизируется в присутствии горячих растворов хлоридов щелочных или щелочноземельных металлов. После инкубационного периода различной продолжительности коррозия под напряжением проявляется в виде быстро распространяющихся глубоких трещин.

Чтобы предотвратить развитие коррозии этого вида, в некоторых случаях необходимо снять напряжения соответствующей термической обработкой.

2.5.3.6. Специальные виды коррозии. Как и при коррозии обычной стали, высокая скорость потока коррозионной жидкости может помешать образованию пассивирующей пленки и в результате будет развиваться локальная коррозия. Защитная пленка также может быть разрушена механическим абразивным воздействием твердых частиц, находящихся в жидкости.

Коррозия, вызванная образованием микропар, возникает в местах соединений различных металлов, например, в местах сварки между нержавеющей и мягкой сталью. В этом случае мягкая сталь становится анодом по отношению к нержавеющей стали и подвергается коррозии. С другой стороны, такое соединение может предотвратить питтинговую или язвенную коррозию нержавеющей стали 18—10 Mo.

Процесс холодной штамповки может привести к образованию механически упрочненного мартенсита, который является

анодом по отношению к аустениту, составляющему остальную структуру, и поэтому становится преобладающей зоной коррозии. Этого явления можно избежать, используя низкоуглеродистые стали с высоким содержанием никеля, в которых аустениты очень стабильны.

2.5.4. ПРИМЕНЕНИЕ НЕРЖАВЕЮЩИХ СТАЛЕЙ

Теперь мы можем сформулировать общие правила применения нержавеющих сталей.

На стадии проектирования:

- отношение поверхности сооружения к объему должно быть минимальным;
- в конструкциях следует избегать соединений под острым углом и изгибов;
- путем правильной организации потока жидкости следует исключать образование застойных зон; в случае, если нельзя избежать образования застойных зон, необходимо предусмотреть дренаж;
- следует избегать применения методов обработки стали, которые способствуют образованию зон механически упрочненного мартенсита;
- соединения внахлестку должны быть сварены с обеих сторон;
- опоры из мягкой стали следует присоединять к конструкциям из нержавеющей стали через промежуточную пластину из нержавеющей стали, чтобы снизить количество мягкой стали, переходящей в металл конструкции при сварке.

На стадии изготовления:

- следует исключить все контакты с железосодержащими металлами;
- применяемый метод сварки не должен влиять на коррозионную стойкость конструкции;
- все детали должны быть обезжирены, а все включения — удалены после штамповки металла или обработки на станке;
- все сварные швы необходимо тщательно очистить от окалины;
- естественная пассивация может быть дополнена контактом с раствором азотной кислоты.

2.5.5. ВЫБОР НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ

В технологии очистки воды практически всегда применяют нержавеющую сталь благодаря ее коррозионной стойкости.

Установить специальные правила для выбора типа нержавеющей стали невозможно, поскольку:

- нержавеющая сталь всегда может подвергаться коррозии различных видов;
- любой находящийся в контакте со сталью элемент (например, кислород) может стабилизировать один вид коррозии, но активизировать другой;

- условия, в которых находится сталь (скорость движения жидкости, турбулентность, возможность образования отложений), являются определяющими факторами в возникновении коррозии;
- механическая обработка нержавеющей стали может повлиять на ее коррозионную стойкость.

Но во всех случаях в сварных конструкциях для предупреждения межкристаллитной коррозии следует применять низкоуглеродистые стали. Следует помнить, что увеличение содержания молибдена, которое обычно сопровождается увеличением содержания никеля, повышает коррозионную стойкость, особенно в случае коррозии, обусловленной присутствием хлоридов, а добавка меди повышает коррозионную стойкость в среде, содержащей серу.

Поэтому предпочтение должно быть отдано стали с очень низким содержанием углерода и высоким содержанием легирующих элементов (например, сталь Z1CNDU25-20), но из-за исключительно высокой стоимости она может быть использована только в том случае, когда риск коррозии особенно велик.

Поскольку трудно выбрать тип нержавеющей стали, рекомендуется начинать не с выбора особого сплава, а с тщательного рассмотрения вопроса, нельзя ли предотвратить коррозию путем использования углеродистой стали без специальной защиты, но с учетом соответствующего кондиционирования среды или применения тщательно выбранного и выполненного антикоррозионного покрытия.

2.6. РАЗРУШЕНИЕ БЕТОНА

Бетон — материал, изготовленный на различных заполнителях и цементе. Стальная арматура железобетонных конструкций теоретически, пока не разрушится бетон, не будет подвергаться коррозии благодаря положительному потенциалу железа в бетоне. При pH около 11,6 значение потенциала приблизительно будет +100 мВ по отношению к водородному электроду. Поэтому в первую очередь необходимо предотвратить разрушение бетона. Исключение составляет предварительно напряженный бетон, в котором арматура благодаря ее легкости и большим напряжениям более хрупкая и больше подвержена химической коррозии под действием просачивающейся воды. Разрушение бетона следует рассматривать, в первую очередь, как процесс механический, а затем уже химический.

2.6.1. МЕХАНИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ БЕТОНА

Механическое разрушение может быть вызвано тремя причинами:

- избыточной проницаемостью. В агрессивной воде необходимо применять очень плотный бетон (300—400 кг/м³);

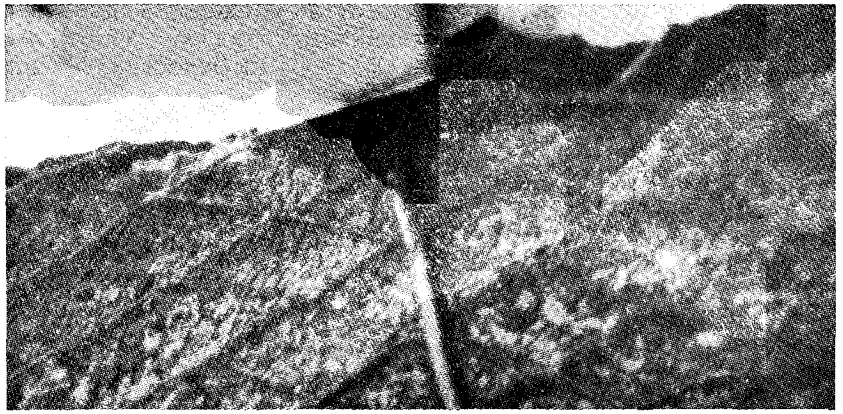


Рис. 2.6. Типичная картина коррозии бетонной трубы

● наличием полостей и трещин из-за нарушения технологии изготовления бетона, качество которого может быть улучшено поддержанием В/Ц<0,45 и добавкой пластификаторов;
● эрозией, вызываемой движением воды при скорости более 4 м/с по трубам или большими температурными градиентами.

2.6.2. ХИМИЧЕСКОЕ РАЗРУШЕНИЕ БЕТОНА

Причины химического разрушения бетона обусловлены составом цемента и коррозионными свойствами воды. Основные компоненты цемента: оксид кремния, известь, глинозем (содержащий железо), оксид магния и щелочи. Цемент обычно образует щелочную среду, содержащую большое количество солей, подверженных сольватации.

При схватывании цемента, и особенно портландцемента, выделяется значительное количество связанной извести в виде $Ca(OH)_2$ и образуется алюминат кальция «C_3A».

В зависимости от состава цемента и химических свойств воды происходит сольватация свободной извести, а иногда и глинозема. Количество основных компонентов в различных цементах приведено в табл. 2.3.

ТАБЛИЦА 2.3

Цемент	Содержание компонента, %			
	SiO_2	Al_2O_3	CaO	SO_3
Портландцемент	20—25	2—8	60—65	<4
Глиноземистый	5—16	30	35—40	<2,5
Сульфатостойкий	—	—	50	>5

Химическое разрушение может быть вызвано несколькими причинами: агрессивностью CO_2, действием сильных кислот, аммиака, сульфатов, сильных щелочей, а также бактериальной коррозией с образованием H_2S.

2.6.2.1. Агрессивное действие CO_2. Бетонные конструкции подвергаются воздействию диоксида углерода в мягкой воде или при содержании в воде избыточного CO_2 более 15 мг/л. Однако высокая щелочность в порах бетона вызывает образование отложений карбоната кальция и других солей, которые временно замедляют разрушение бетона такой водой.

Действие диоксида углерода не приводит к существенному разрушению бетона, если щелочность, обусловленная бикарбонатом кальция, превышает 1—1,2 мг-экв/л и pH выше 6,5, что соответствует условиям, близким к углекислотному равновесию.

2.6.2.2. Разрушение бетона сильными кислотами. Коррозия бетона резко усиливается с повышением растворимости образующихся солей кальция. Скорость коррозии бетона возрастает в присутствии фосфорной, серной, азотной, соляной и других кислот. Органические кислоты также вызывают коррозию бетона.

Если кислотность среды не очень высокая, коррозионную стойкость бетона можно увеличить снижением водоцементного отношения и (или) применением глиноземистого цемента, использование которого вызывает определенные трудности. Он применяется при значениях pH>2 и требует соблюдения некоторых предосторожностей.

Бетонные конструкции часто подвержены образованию трещин и полностью могут быть защищены путем нанесения соответствующих покрытий.

Некоторые правила по сбросу сточных вод рекомендуют, чтобы pH воды, находящейся в контакте с бетонными конструкциями, был в диапазоне 4,5 (или 5,5) — 9.

2.6.2.3. Действие аммиака, содержащегося в сточных водах, может вызвать разрушение бетона вследствие развития реакций нитрификации, которые приводят к образованию кислоты, но могут идти только в аэробной среде (например, в открытых градирнях), и в результате выделения аммиака, замещенного известью, который ускоряет сольватацию последней и вызывает быстрое разрушение цемента. Тот же процесс может начаться под действием солей магния или других оснований, более слабых, чем известь. Поэтому следует избегать избыточных концентраций NH_4^+ и Mg^{2+}, особенно при наличии в воде сульфатов.

2.6.2.4. Действие сульфатов очень сложно. Оно основано на превращении сульфата кальция в расширяющуюся соль, известную под названием эттрингита. При этом происходит:

сульфатирование свободной извести в цементе сульфатами, растворенными в воде:

$$Ca(OH)_2 + Na_2SO_4 + 2H_2O \rightarrow CaSO_4 \cdot 2H_2O + 2NaOH;$$

превращение алюминатов в цементе в эттрингит, который сильно расширяется (в 2—2,5 раза):

$$3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 12H_2O + 3CaSO_4 \cdot 2H_2O + 13H_2O \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 31H_2O.$$

В присутствии магния эти два основных процесса могут сопровождаться разложением содержащихся в цементе щелочных силикатов.

Немецкий стандарт DIN 4030 устанавливает пределы оценки агрессивности соленой воды по отношению к бетонам стандартных марок (табл. 2.4).

ТАБЛИЦА 2.4

Вода	pH	Концентрация агрессивной углекислоты, мг/л (метод Гейера)	Содержание ионов, мг		
			аммония, мг NH_4^+/кг	магния, мг Mg^{2+}/кг	сульфат-, мг SO_4^{2-}/кг
Слабо агрессивная	6,5—5,5	15—30	15—30	100—300	200—600
Агрессивная	5,5—4,5	30—60	30—60	300—1500	600—2500
Очень агрессивная	<4,5	>60	>60	>1500	>2500

Если вода агрессивна, для защиты бетона рекомендуется применять покрытия; в случае очень агрессивных вод возможно использование шлакового бесклинкерного цемента с высоким гидравлическим модулем при условии, что другие химические показатели воды не играют роли (например, клинкерный цемент CLK, содержащий 80% шлаковых агрегатов, и шлаковый, содержащий 60—75% доменного шлака. Поэтому в морской воде можно применять различные цементы с низким содержанием C_3A (см. с. 52).

2.6.2.5. Коррозия бетона сильными щелочами (NaOH, KOH, Na_2CO_3). Вода с высоким содержанием щелочи оказывает разрушающее действие на все цементы, так как некоторые составляющие на основе глинозема подвергаются сольватации. Поэтому когда отсутствуют защитные покрытия, не рекомендуется допускать контакт воды с обычными цементами, если pH>12, или с глиноземистыми цементами, если pH>8,5.

2.6.2.6. Бактериальная коррозия бетона с образованием H_2S происходит в канализационных коллекторах. Принцип коррозии в анаэробной среде уже описан. Как известно, в охлаждающих системах этот процесс следует за химической коррозией и ускоряет ее. В бытовых сточных водах или сильно загрязненных стоках он обычно является результатом анаэробной ферментации отложений.

Процесс протекает в две стадии: образование и выделение H_2S; окисление H_2S в воде до H_2SO_4. Эти реакции ускоряются при значениях pH<6 и повышении температуры воды.

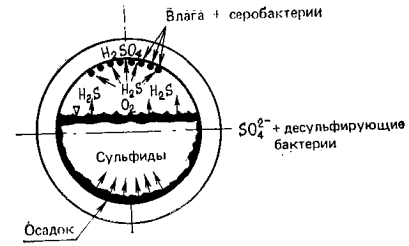


Рис. 2.7. Механизм коррозионного воздействия сероводорода на канализационную трубу

В канализационных коллекторах выше уровня воды происходит разрушение бетона из-за снижения концентрации кислорода и конденсации воды. Практически единственный путь предотвращения коррозии этого типа состоит в том, чтобы поддерживать высокие скорости потока после предварительного отстаивания и аэрирования воды и избегать создания турбулентности и деаэрации воды в трубах.

2.7. КОРРОЗИЯ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ

Рассмотрим характеристики некоторых чистых металлов и их сплавов. С целью предупреждения коррозии цветных металлов необходимо руководствоваться следующими основными положениями:

- не применять вместе различные материалы, поскольку возможно интенсивное развитие коррозии в результате образования макроэлементов;
- не допускать чрезмерно высокого нагрева металлических деталей, находящихся в контакте с водой, так как это может вызвать интенсивную коррозию в результате образования пар дифференциальной аэрации; нежелательны также местные изменения температуры;
- стараться избегать образования застойных зон, в которых происходит снижение концентрации кислорода в воде, так как это может привести к разрушению пассивирующей пленки и растворению токсичных металлов (Pb, Cu).

2.7.1. АЛЮМИНИЙ

Этот металл, имеющий высокий отрицательный потенциал (—1,34 В), теоретически очень подвержен коррозии, но в действительности пассивируется в результате окисления влажным воздухом и образования защитной пленки оксида алюминия. Эту пассивацию можно вызвать искусственно анодным окислением.

Алюминий иногда применяют в морской воде при условии, что, во-первых, на нем не образуются отложения загрязнений,

что приводит к возникновению катодных участков, и, во-вторых, применяется технически чистый алюминий. Алюминий можно использовать в слабо кислых водах, но его контакт со щелочными водами недопустим.

2.7.2. МЕДЬ

В воде, содержащей кислород, происходит естественная пассивация меди пленкой оксида меди CuO, которая имеет малую растворимость, но на практике может подвергаться сольватации в виде комплекса аммиаком или цианидами. Тем не менее эта окисная пленка в отличие от пленки, образующейся на алюминии, часто оказывается пористой, и поэтому при производстве и применении медных труб должны быть приняты меры предосторожности.

Сквозные изъязвления и питтинговая коррозия меди иногда наблюдаются в холодных минерализованных водах (питтинг типа I) и при использовании отожженных труб. Те же явления происходят в горячей воде с низким солесодержанием (питтинг типа II).

2.7.3. СВИНЕЦ

Оксид свинца PbO и гидроксид свинца $Pb(OH)_2$ относительно растворимы. Поэтому все воды, содержащие кислород, очень коррозионны и опасны для свинца, кроме вод, которые одновременно имеют высокую бикарбонатную щелочность (выше 2,4 мг-экв/л) и малое содержание свободного диоксида углерода (pH немного выше 7). В этом случае может образовываться гидроксикарбонат, который характеризуется значительно меньшей растворимостью, чем гидроксид и, следовательно, защищает металл, если одновременно происходит осаждение карбоната кальция.

Однако в настоящее время рекомендуется ограничивать применение свинцовых труб для питьевого водоснабжения; и оно должно быть полностью исключено для мягкой воды.

2.7.4. ОЦИНКОВАННЫЕ СТАЛИ

Рассмотрим покрытия, полученные или электроосаждением цинка, или горячим цинкованием (погружением в ванну с цинком при температуре 450 °C или непрерывным процессом Sendzimir). В этом случае слой η-фазы переменной толщины прочно связан со сталью, а его внешняя поверхность окисляется с образованием гидроксида цинка, оксида или гидроксикарбоната в зависимости от температуры и щелочности воды. Пленка имеет очень сложную структуру и замедляет коррозию цинка торможением диффузии кислорода. Скорость коррозии, которая велика в мягкой воде, значительно уменьшается в водах, содержащих бикарбонат кальция.

Значительные концентрации хлоридов, особенно в щелочной среде, могут вызывать осаждение нерастворимых оксихлоридов, что одновременно увеличивает вероятность питтинговой коррозии.

Защитная пленка имеет более низкую электрическую проводимость, чем пленка, образующаяся на других металлах, и не изменяет потенциал цинка, поэтому действует скорее как лакокрасочное покрытие или растворимый анод, чем как пассивирующая пленка.

При высокой коррозионной активности воды и разрушении пленки цинк, который имеет высокий отрицательный потенциал (—0,776 В), подвергается ускоренной коррозии, заканчивающейся коррозией железа с образованием ржавчины.

Влияние температуры. Скорость коррозии резко возрастает с повышением температуры, достигает максимума при 60 °C и затем снижается до начального значения при 100 °C. При 60 °C все гидроксиды цинка превращаются в более пористый оксид, который имеет плохую адгезию с металлом и образует пленку с более положительным потенциалом, чем потенциал цинка. В результате полярность элемента «защитная пленка — железо» изменяется на противоположную. Это вызывает ускоренную сквозную коррозию незащищенной поверхности стали.

Действие меди. Появление ионов Cu^{2+} в растворе (экзогенная медь, попавшая в воду в систему выше по течению) повышает электрическую проводимость пленки оксида цинка и в результате скорость коррозии стали возрастает. Поэтому цинкование стали обеспечивает устойчивое замедление коррозии только в воде с низкой коррозионной активностью. При использовании оцинкованных труб в воде с высокой коррозионной активностью, и особенно в морской воде, следует иметь в виду временный характер защиты, которую обеспечивает цинкование.

2.7.5. ЛАТУНИ

Латуни — это медно-цинковые сплавы со следующими стандартными составами (табл. 2.5):

Состав III рекомендуется использовать в морской воде.

Обесцинкование или растворение цинка с выделением остаточной Cu иногда происходит в латуни типа I и реже в других. Металл становится пористым и хрупким. Обесцинкование усиливается в присутст-

ТАБЛИЦА 2.5

Состав	Содержание, %			
	меди	цинка	алюминия	олова
I	70	29	—	1
II	60	40	—	—
III	76	22	2	—

вии солей и вызывает образование элементов, в которых латунь служит анодом, что приводит к быстрому разрушению сплава, которое может быть предотвращено наличием в сплаве мышьяка или сурьмы. В настоящее время имеются сорта латуни, применение которых позволяет решить эту проблему.

2.8. ДЕЙСТВИЕ МОРСКОЙ ВОДЫ

2.8.1. КОРРОЗИОННАЯ АКТИВНОСТЬ И ОБРАЗОВАНИЕ ОТЛОЖЕНИЙ

Высокая степень коррозионной активности морской воды обусловлена содержанием в ней кислорода и ее температурой. Холодная вода, перекачиваемая с больших глубин в Северном море, например, менее коррозионна, чем теплая вода с поверхности моря в тропиках. Этот тип коррозионной активности не может быть оценен с помощью индекса Ризнера.

При коррозии в морской воде иногда наблюдается процесс пассивации, который сильнее замедляет коррозию, чем в случае пресной воды.

При температуре выше 60 °С морская вода способна образовывать карбонатные отложения на известняке и неметаллических материалах, таких как камни. С другой стороны, быстрая коррозия может сопровождаться образованием отложений там, где есть контакт с металлами, содержащими и несодержащими железо. Процессы электрохимической коррозии усиливаются с увеличением различий между металлами.

Ионы Mg^{2+} в морской воде действуют как замедляющий фактор, способный уменьшить вдвое силу коррозионного тока.

2.8.2. ЗАЩИТА ПРОТИВ ОБРАЗОВАНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ

При температуре ниже 100 °С образование отложений в морской воде происходит исключительно за счет бикарбоната кальция. С повышением температуры и некоторых концентраций также осаждается сульфат кальция.

Первая проблема может быть решена:

подкислением морской воды с целью снижения общей щелочности;

обработкой полифосфатами; их действие ограничено температурами ниже 70 °С, но при более высоких температурах полифосфаты можно заменить соединениями фосфиновой кислоты, которые устойчивы при температуре выше 130 °С (максимальная температура на некоторых горячих участках).

Вторая проблема может быть решена только частичным удалением из воды кальция.

2.8.3.1. Способы защиты от коррозии при создании конструкций. Рекомендуется применять бетонные трубы и стальные, покрытые эпоксидной смолой, эбонитом или битумными покрытиями; днища теплообменников и распределительных устройств покрывать полимерными материалами (рильсан и т. п.); использовать трубчатые теплообменники, выполненные из морской латуни или латуни 76.22.2, которая меньше подвержена обесцинкованию.

Применение титановых теплообменников находит быстрое распространение на электростанциях.

2.8.3.2. Способы защиты от коррозии при эксплуатации.

Катодная защита достигается:

применением активных анодов, выполненных из Mg или Al, которые иногда используют в морской воде (с низким удельным сопротивлением). Эти аноды обеспечивают только минимальную ограниченную защиту;

наложением внешней э.д.с. Этот метод можно применять для защиты решеток, барабанных сеток и длинных участков труб.

Химические методы:

для защиты пучков латунных трубок воду обрабатывают сульфатом железа (II), что приводит к образованию пассивирующей пленки гидроксида железа. Этот метод применяется в конденсаторах на кораблях.

Для защиты пучков стальных трубок в воду вводят фосфат-цинковые ингибиторы. Ингибирование обеспечивает эффективную защиту (см. гл. 14).

Удаление растворенного кислорода:

вакуумной и напорной деаэрацией (см. гл. 13). Этот метод предназначен для вод, используемых при заводнении нефтяных пластов;

химическим обескислороживанием бисульфатом натрия с применением катализаторов (см. гл. 14).

2.8.4. ЗАЩИТА ОТ ОРГАНИЧЕСКИХ ОБРАСТАНИЙ

Биологические обрастания — основная причина коррозии под отложениями и снижения эффективности работы теплообменников. Имеются три основных источника биологических обрастаний: органическая слизь бактерий и водорослей, закрепление мягких организмов, таких как асцидия, морские анемоны и трудно удаляемая инкрустация колониями твердых организмов (ракообразные, мидии, устрицы и морские уточки), которая вызывает сквозную коррозию под отложениями в результате дифференциальной аэрации.

С ростом водорослей бороться значительно легче, чем с ростом ракообразных. Для борьбы с водорослями рекомендуется

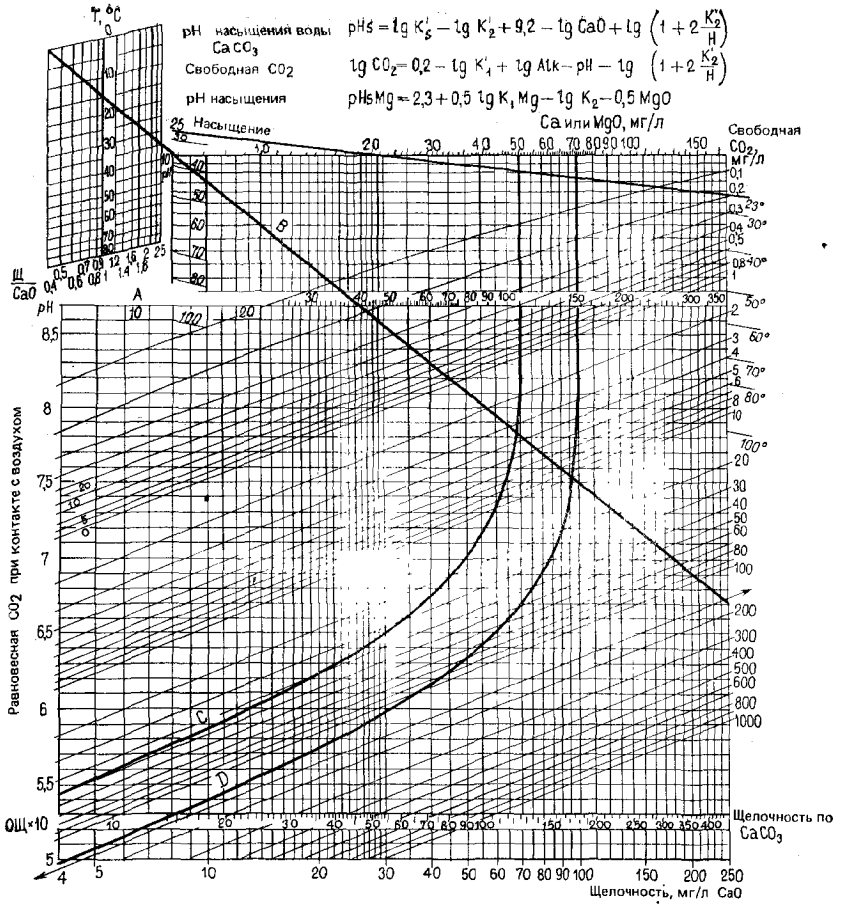


Рис. 2.8. Диаграмма Галлопэ и Дюбена

A — Co_2 в бикарбонатах (при pH<8,7); *B* — насыщение $CaCO_3$ при 15° С; *C* — нейтрализация мрамором; *D* — нейтрализация известью: ОЩ — общая щелочность воды · 10; CaO — общая концентрация кальция, мг/л CaO

периодически хлорировать морскую воду дозами 3—8 г $Cl_2/м^3$ 1—4 раза в сутки; содержание свободного хлора должно составлять 1 г/м³ в течение 10—15 мин на выходе из системы.

Распределение хлора следует тщательно контролировать на всасывающих устройствах насосов. Правила хранения хлора настолько строги, что сейчас предпринимаются усилия заменить его прямым электролизом морской воды.

Для борьбы с ростом ракообразных рекомендуется непрерывно обрабатывать воду хлором в количестве 0,5—1 г/м³ в течение 5 недель весной и осенью; непрерывное хлорирование рекомендуется, когда температура воды превышает 20 °С.

3. ТЕОРИЯ ОСНОВНЫХ ПРОЦЕССОВ ОБРАБОТКИ

Очистка воды обычно представляет собой комбинацию нескольких процессов: физических, химических, биологических. Они обеспечивают вначале удаление всех взвешенных веществ, затем коллоидных и некоторых растворенных неорганических и органических примесей. Отдельные характеристики воды нуждаются в корректировке.

В зависимости от объективных условий могут быть применены различные принципы обработки на каждой стадии. Рассмотрим важнейшие из них.

3.1. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

3.1.1. УДАЛЕНИЕ ВЗВЕШЕННЫХ И КОЛЛОИДНЫХ ВЕЩЕСТВ

3.1.1.1. Общие замечания. Вне всякого сомнения, наибольшая степень загрязнения воды обусловлена присутствием в ней различных нерастворенных примесей. Эта фракция должна быть удалена из воды, чтобы исключить широкий круг проблем, вызываемых нерастворенными примесями. К важнейшим из них относятся: засорение труб и охлаждающих систем, абразивное воздействие на насосы и измерительное оборудование и изнашивание различного другого оборудования, что серьезно отражается на текущих и эксплуатационных расходах действующих предприятий. Если же речь идет о питьевой воде и очищенных стоках, то необходимо учитывать дополнительные факторы в соответствии с официальными требованиями.

Для выделения нерастворенных примесей из воды могут быть применены различные методы, основанные на двух различных принципах:

- непосредственное использование силы тяжести путем прямой седиментации, где определяющим фактором является размер и удельная масса частиц, или путем флотации, когда пузырьки воздуха систематически вводятся в суспензию и присоединяются к частицам. Первый процесс может быть усилен с помощью центробежных сил, используемых в циклонах и центрифугах;
- фильтрование или процеживание.

Однако неподтвержденное опытом применение этих принципов может привести к осложнениям вследствие того, что размеры частиц могут изменяться в широких пределах даже для определенного типа примесей.

Сведения о материалах и организмах с указанием их средних размеров и приблизительного времени, необходимого для осаждения этих частиц в вертикальном столбе воды высотой 1 м

ТАБЛИЦА 3.1

Материал или организм	Диаметр частиц, мм	Время осаждения в столбе воды высотой 1 м (приблизительно)
Гравий	10	1 с
Песок	1	10 с
Мелкий песок	0,1	2 мин
Глина	0,01	2 ч
Бактерия	0,001	8 сут
Коллоидные частицы	0,0001	2 года
Коллоидные частицы	0,00001	20 лет

под влиянием только силы тяжести, приведены в табл. 3.1.

В 1 л воды хорошего качества могут содержаться десятки миллионов частиц мельчайших размеров. Несмотря на их количество, общая масса этих частиц может быть менее 0,1 мг.

Качество воды — понятие относительное, поэтому приемлемый и достижимый уровень остаточных загрязнений следует определять с учетом существующих требований. Кроме того, необходимо установить методы измерения двух обычно используемых критериев: концентрации взвешенных веществ и мутности воды. Последний характеризует наличие мельчайших частиц, невидимых невооруженным глазом.

Коллоидные суспензии и их устойчивость в воде. Из табл. 3.1 видно, что естественная скорость осаждения мелкой взвеси, или так называемых коллоидных частиц, очень мала, хотя в то же время именно эта взвесь составляет бóльшую часть примесей и обусловливает мутность воды. При любом виде обработки требуется изменить условия таким образом, чтобы частицы могли коалесцировать между собой с образованием больших агломератов, которые легко удалить. Коалесценция не проходит самостоятельно, так как коллоидные соединения характеризуются наличием сил, поддерживающих взвесь в диспергированном состоянии с необычайно высокой степенью стабильности в течение длительного времени. Такая стабильность объясняется сольватацией или защитным действием определенных адсорбированных веществ, а также действием электростатических сил, которые отталкивают частицы друг от друга. В природных водах коллоиды всегда имеют отрицательный заряд. В сточных водах — это наиболее распространенный случай. В результате сольватации коллоидные частицы на поверхности оказываются частично ионизированными. В микроскоп можно наблюдать, что наложение электрического поля вызывает их движение.

Теоретическая интерпретация этого электрокинетического явления, например электрофореза, заключается в предположении наличия двойного ионного слоя на разделе фаз твердое вещество — жидкость с определенным строением этого двойного слоя (рис. 3.1).

Одна часть двойного слоя прикреплена к поверхности раздела фаз (стенке), а другая создает облако ионов. V — это потенциал жидкости по отношению к электроду сравнения.

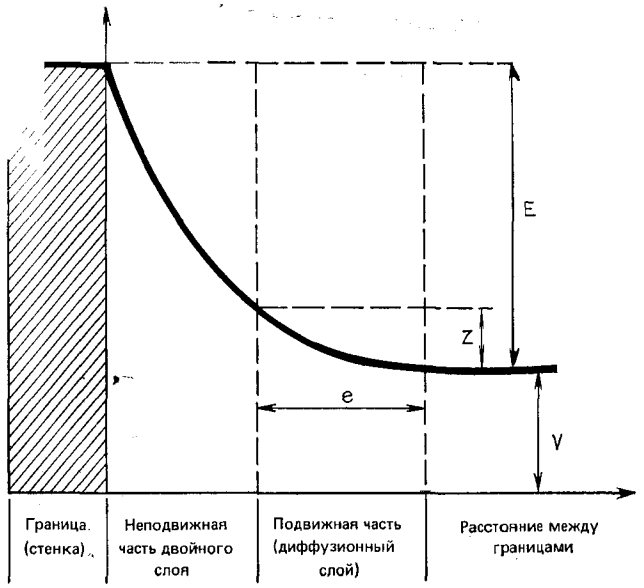


Рис. 3.1.

Дзета-потенциал. Разность потенциалов, возникающая между неподвижной и подвижной частями слоя (в объеме жидкости), традиционно называется Z (дзета)-потенциалом или электрокинетическим потенциалом, отличным от термодинамического потенциала E, который представляет собой разность потенциалов между поверхностью частиц и жидкостью.

Дзета-потенциал зависит как от E, так и от толщины двойного слоя. Его значение определяет величину электростатических сил отталкивания частиц, и следовательно, вероятность адгезии. Прибор, используемый для измерения Z-потенциала, называется дзетаметром (см. с. 983).

Если частицы подвергнуть действию электрического поля, то практически мгновенно устанавливается такая скорость, при которой достигается равновесие между электрическими силами притяжения и силами трения, обусловленными вязкостью среды.

Между Z-потенциалом и подвижностью частиц имеет место соотношение

$$Z = k\eta\mu/D,$$

где η — динамическая вязкость, дПа·с; D — диэлектрическая постоянная среды; μ — подвижность частиц, мкс/(v·см); Z — потенциал — выражается в mV.

Фактор k зависит от относительных значений диаметра частиц и толщины двойного ионного слоя (табл. 3.2).

Частицы	k	Формула
Относительно большие	4π	Гельмгольца
Малые, приближенно шарообразные	6π	Гюккеля

Все частицы с разным электрокинетическим потенциалом имеют одинаковую подвижность независимо от их радиуса.

Экспериментальные кривые для воды и осадка дают представление о распределении частиц в процентном отношении в зависимости от величины потенциала. Максимум на кривой (рис. 3.2) характеризует дзета-потенциал коллоидов, содержащихся в воде или в осадке (где *а* — промытый уголь, *б* — вода от мокрой газоочистки доменной печи, *в* — сброженный осадок).

3.1.1.2. Коагуляция и флокуляция

Дестабилизация коллоидной суспензии. Чтобы осуществить разделение коллоидной суспензии посредством силы тяжести с достаточной скоростью, необходимо вызвать агломерацию

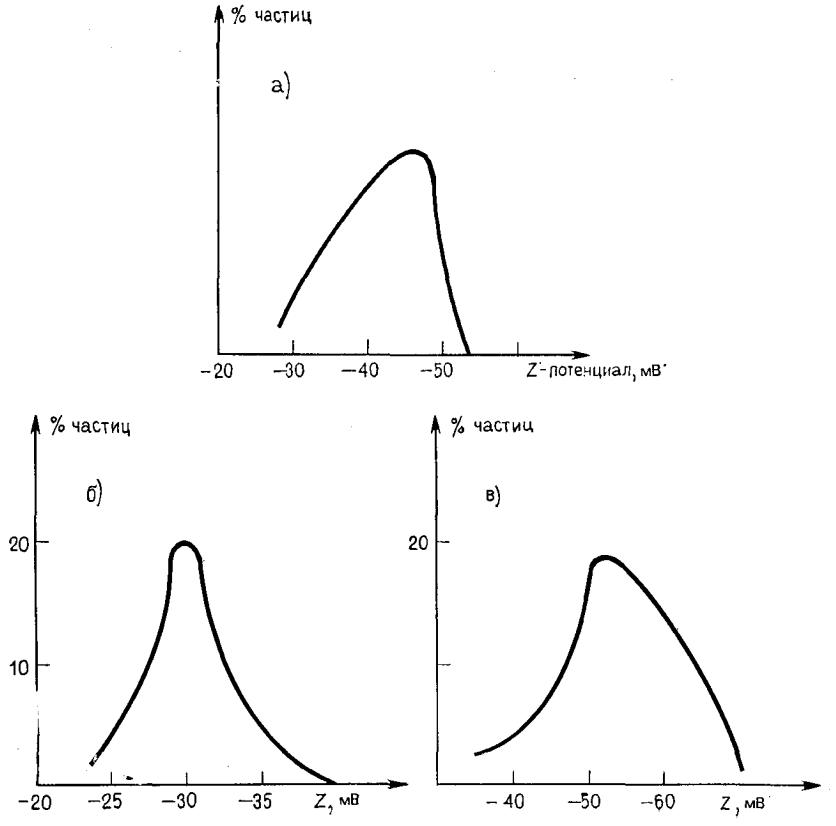


Рис. 3.2.

коллоидных примесей с образованием относительно крупных частиц.

Суспензия должна быть подвергнута искусственной обработке. Такое изменение суспензии может быть результатом двух различных процессов:

дестабилизации, достигаемой обычно добавлением химических реагентов, которые путем сцепления или адсорбции снимают действие сил отталкивания, или же путем воздействия на гидрофильные коллоидные частицы;

агломерации «нейтрализованных» коллоидов.

Агломерация является результатом действия различных сил притяжения между частицами, приходящими во взаимный контакт вследствие броуновского движения до тех пор, пока их размер не достигнет 0,1 мкм, а также результатом воздействия внешнего механического встряхивания, приводящего к образованию хлопка требуемого размера.

В практике обработки воды термин «коагуляция» принято относить к процессам дестабилизации и термин «флокуляция» — к укрупнению (агломерации) нейтральных коллоидов. Соответствующие реагенты известны как коагулянты и флокулянты.

Коагулянты и флокулянты.

Применение. Систематическое использование поливалентных катионов неорганических солей в качестве коагулянтов началось в последние годы прошлого столетия, когда были установлены законы, управляющие их действием, и когда было показано, что эффект коагуляции зависит от валентности иона, несущего заряд, противоположный знаку заряда частицы. Чем выше валентность, тем более эффективно коагулирующее действие (правило Шульце — Гарди). Эта теория, в частности, объясняет причину применения трехвалентных солей железа и алюминия в любых очистных системах с коагуляционной обработкой воды. Коагулянты, гидролизуясь, вызывают нежелательные изменения физико-химических характеристик обрабатываемой воды, pH, удельной электрической проводимости. Использование этих коагулянтов в больших дозах ведет к образованию избыточных количеств осадка, что часто вызывает большие затруднения. Более того, реагенты не всегда образуют осадок, обладающий характеристиками, необходимыми для его эффективного осаждения.

Указанные недостатки явились причинами применения других коагулянтов: не только природных веществ как неорганических (активная кремнекислота), так и органических (крахмал, альгинаты), но и синтетических реагентов (полимеров с высокой молярной массой), известных под названием полиэлектролиты.

Неорганические коагулянты. Наиболее часто в качестве коагулянтов используют соли железа и алюминия. По экономическим соображениям соответственно применяют суль-

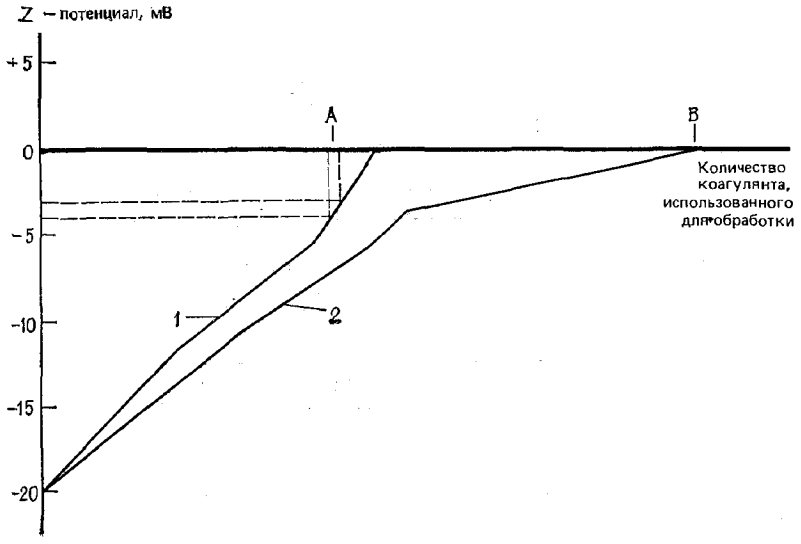


Рис. 3.3. Определение дозы реагента с помощью Z-потенциала

фат алюминия и хлорное железо. Коагулирующее действие этих солей есть результат гидролиза, который проходит вслед за растворением, но не приводит сразу к образованию гидроксидов, таких как $Al(OH)_3$. Промежуточные соединения алюминия — гидроксиалюминиевые комплексы — не только обусловливают изменения, необходимые для нейтрализации коллоидов, но в соответствии с уже сказанным способны к полимеризации, т. е. к образованию мостиков между коллоидами, чем обеспечивается инициация процессов флокуляции.

Количество коагулянта, которое следует применить для обработки воды, определяют опытным путем (см. текст по флокуляции, с. 984 определение полезно подтвердить измерением дзета-потенциала суспензии).

В зависимости от качества исследуемой воды характер кривой, показывающей изменение дзета-потенциала как функции дозы реагента, может изменяться в широких пределах.

Чтобы получить воду хорошего качества, достаточно (в случае, описываемом кривой, близкой к кривой *1* на рис. 3.3) добавить реагент в количестве, соответствующем точке *A*, что дает возможность достигнуть значения потенциала в пределах от —3 до —5 *mV*. С другой стороны, в случае, описываемом кривой *2*, необходимо добавить реагент в количестве, равном *B*, что снизит дзета-потенциал до нуля.

Значение величины pH очень важно учитывать при изучении явлений коагуляции и флокуляции. Так, например, часть заряда коллоидной частицы, адсорбировавшей OH^- — ионы,

нейтрализуется при увеличении концентрации H^+ — ионов, что приводит к уменьшению стабильности коллоидной суспензии.

Предпочтительнее также работать в интервале значений pH, соответствующих минимальной растворимости металла используемого коагулянта.

Что касается солей алюминия, минимальная концентрация ионов Al^{3+} в растворе имеет место при значениях pH между 6 и 7,4. За пределами этих значений концентрация растворенных ионов алюминия может быть более высокой в зависимости от общей минерализации воды.

В некоторых исключительных случаях обрабатываемая вода уже содержит большое количество примесей, богатых соединениями алюминия. Увеличение pH вызывает коагуляцию этих соединений.

Для солей железа интервал значений pH шире, а минимальная растворимость достигается, как только pH превышает 5.

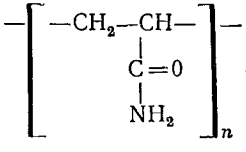
Флокуляция.

Активная кремнекислота представляет собой раствор поликремневой кислоты $(H_2SiO_3)_4$, получаемый полимеризацией кремневой кислоты в контролируемых условиях. Раствор нестабилен и готовится непосредственно перед использованием. Несмотря на этот недостаток и даже на развитие химии полиэлектролитов, активная кремнекислота длительное время была лучшим флокулянтом, способным связывать соли алюминия. Она до сих пор еще широко применяется в процессах обработки питьевой воды.

Органические полимеры — это длинноцепочные макромолекулы, либо встречающиеся в природе, либо полученные путем соединения синтетических мономеров; некоторые из них несут электрический заряд или имеют группы, способные к ионизации. Природные полимеры чаще неэффективны, а использование синтетических полимеров обычно приводит к высшей степени эффективному результату. Каждая страна создает свои собственные санитарные правила, определяющие использование полимеров для обработки воды.

В соответствии с ионным характером активных групп синтетические полимеры, общеизвестные как полиэлектролиты, распределяются на:

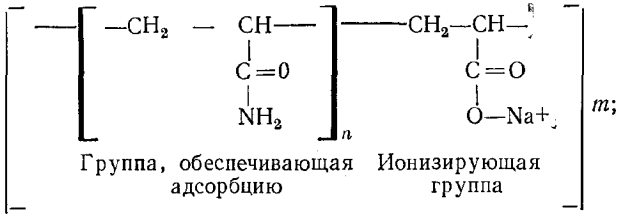
● неионогенные полимеры, представленные почти исключительно полиакриламидами с молярной массой от 1 до 30 млн.



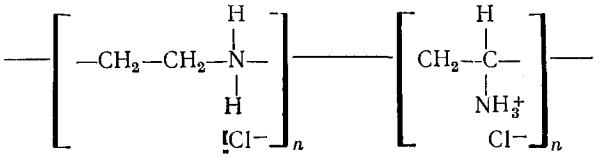
—обычная формула полиакриламида;

● анионные полиэлектролиты с молярной массой в несколько миллионов, содержащие как группы, обусловливающие адсорбцию, так и отрицательно заряженные ионные группы (карбо-

ксильные или сульфогруппы), которые удлиняют полимер. Наиболее известны полиакриламиды, частично гидролизованные содой, с формулой:



● катионные полиэлектролиты, имеющие в своих цепях положительный электрический заряд благодаря наличию аминной, иминной или аммониевой группы:



В связи с относительно несложным процессом получения многозарядных катионных макромолекул, область их практического применения расширилась; в некоторых случаях их используют для процессов коагуляции.

Положительные заряды полиэлектролита нейтрализуют отрицательные заряды коллоидов и снижают Z-потенциал. Снижение Z-потенциала с помощью полиэлектролитов происходит быстрее, поскольку при большем числе макромолекул вероятность столкновения с коллоидными частицами возрастает. Кривые C_1 и C_2, приведенные ниже, описывают эти два типа действия.

С другой стороны, анионные и неионогенные полиэлектролиты не снимают Z-потенциала. Кривые, полученные с этими полиэлектролитами, имеют сходство с изотермами адсорбции: активные радикалы цепи полимера адсорбируются на частицах, вызывая изменение состояния поверхности частицы и вследствие этого их Z-потенциала, что приводит затем к агломерации частиц в хлопок посредством поперечно-связующего механизма.

3.1.1.3. Осаждение и осветление. Различают два типа веществ, которые могут осаждаться: гранулированные частицы, осаждающиеся независимо друг от друга с постоянной скоростью, а также более или менее флокулированные частицы естественного происхождения или с индуцированной агломерацией коллоидных веществ в суспензии.

Если концентрация вещества мала, то диспергированные хлопья осаждаются так, как если бы каждый хлопок был в

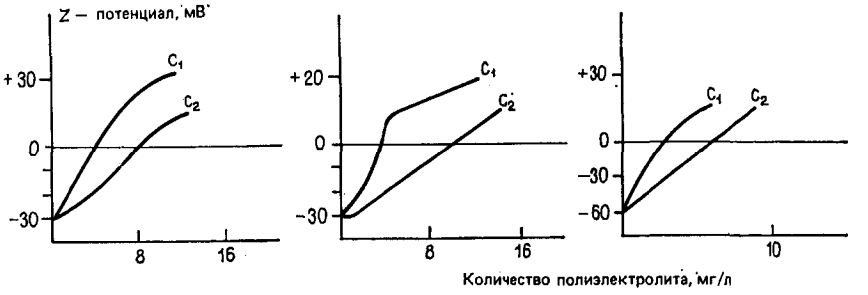


Рис. 3.4. Количество полиэлектролитов, мг/л. Катионные полиэлектролиты

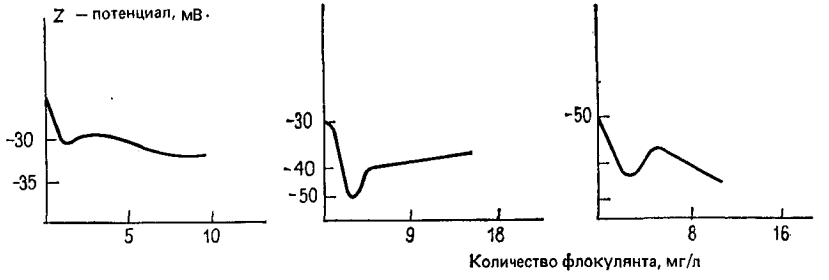


Рис. 3.5. Количество флокулянта, мг/л. Анионные полиэлектролиты

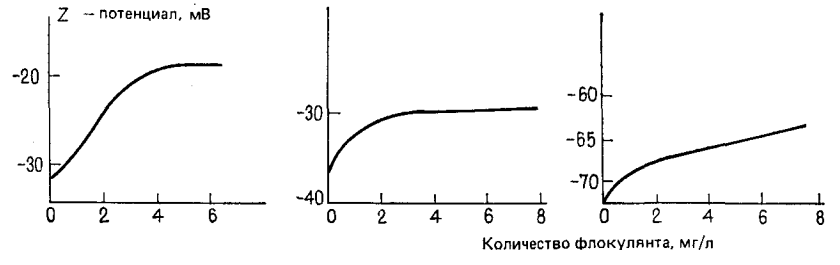


Рис. 3.6. Количество флокулянта, мг/л. Неионогенные полиэлектролиты

единственном числе, но скорость их осаждения возрастает, поскольку увеличивается размер хлопка вследствие столкновения его с более мелкими частицами: это — диффузное осаждение. В случае высокой концентрации большое количество хлопьев является причиной замедленной седиментации с явно выраженной границей раздела между массой осадка и жидкостью над ним: это — зонное осаждение.

Осаждение гранулированных частиц

Теоретические положения.

Когда гранулированная частица находится в жидкости в состоянии покоя, она подвержена действию движущей силы $F_м$, называемой гравитационной, а также силы сопротивления $F_т$,



Рис. 3.7.

торможения со стороны жидкости, которая является результатом вязкости и инерционных сил (рис. 3.7).

Если частица сначала имеет нулевую скорость, а затем начинает перемещаться и движение ее ускоряется, то спустя время t она приобретает фактически постоянную скорость (конечную). Это время почти всегда незначительно в сравнении с временем осаждения в действующих установках. Постоянную скорость вычисляют по формуле Ньютона

$$v^{2-n} = \frac{4d^{1+n} g (\rho_s - \rho_e)}{3C\rho_e},$$

где v — конечная скорость, см/с; d — диаметр частицы, см; $g = 981$ см/с^2; ρ_s и ρ_e — плотности соответственно гранулированной частицы и жидкости; C — коэффициент сопротивления, связанный с числом Рейнольдса Re по формуле $C = a\mathrm{Re}^{-n}$; a и n — коэффициенты.

Число Рейнольдса $\mathrm{Re} = v\rho d/n$ может быть интерпретировано как отношение инерционных сил к силам динамической вязкости.

Если число Рейнольдса мало, то силы вязкости много больше, чем инерционные силы. Если число Рейнольдса велико, то силы вязкости незначительны. В табл. 3.3 приведены различные значения a, n и C в зависимости от числа Рейнольдса.

ТАБЛИЦА 3.3

Re	a	n	C	Формула
$10^{-4} < \mathrm{Re} < 1$	24	1	24/Re	Стокса
$1 < \mathrm{Re} < 10^3$	18,5	0,6	$18{,}5\mathrm{Re}^{0{,}1}$	Аллена
$10^3 < \mathrm{Re} < 4 \cdot 10^5$	0,44	0	0,44	Ньютона

Эти формулы являются исходными для вычисления скорости движения частиц в жидкости и используются для расчета осветлителей (осаждение гранулированных твердых частиц в жидкости, капель воды в воздухе), разделения в восходящем потоке (пузырьки воздуха в воде, капли масла в воде), центрифугирования и ожижения.

Фактор коррекции — сферический фактор ψ. Это — соотношение между объемом сферы, равной по площади общей поверхности частицы, и объемом частички.

Если применяется закон Стокса, то

$$C^1 = C\psi = 24\psi/\mathrm{Re}$$

Материал	*Значение* ψ	*Материал*	*Значение* ψ
Песок	2	Графитовая крошка	22
Уголь	2,25	Слюда	170
Тальк	3,25	Гипс	4

С учетом указанных данных можно вычислить скорость осаждения гранулированных частиц. В вертикальном отстойнике частицы осаждаются со скоростью, превышающей восходящую скорость жидкости. В вертикальном резервуаре глубиной H (рис. 3.8) взвешенные частицы, оказавшиеся на поверхности, после поступления их в отстойник осаждаются с постоянной скоростью падения v_s и достигают дна резервуара за период $t = H/v_s$.

Если $S_н$ — площадь поверхности резервуара и Q — часовой расход, то объем C резервуара будет $C = HS_н = Qt$, откуда $v_s = H/t = Q/S_н$.

Все частицы со скоростью осаждения, превышающей v_s, оседают полностью. Те частицы, скорость которых v_{s_1} меньше v_s, осаждаются пропорционально отношению v_{s_1}/v_s.

Если взвешенные вещества представляют собой частицы с различными скоростями осаждения, то количество оседающих веществ можно рассчитать по формуле

$$(1 - C_0) + \frac{1}{v_s} \int_0^{C_0} v dC,$$

в которой C_0 — фракция частиц, имеющих скорость осаждения, равную или меньшую чем v_s.

Поверхностная нагрузка Ch — это отношение часового расхода к площади горизонтальной поверхности $S_н$. Ее значение, которое зависит от формы резервуара и расхода, надежно определяет скорость осаждения частиц за период седиментации t_0. Верхний предел Ch (м/ч) поэтому соответствует скорости осаждения v_s этих частиц.

Диффузное осаждение

Частицы слипаются (коалесцируют), затем флокулируют и осаждаются с возрастающей скоростью. В резервуаре с горизонтальным гидравлическим потоком траектория осаждения описывается кривой на рис. 3.9. Эффективность диффузного осаждения зависит не только от нагрузки на поверхность, но и от длительности осаждения.

Математической формулы для расчета скорости осаждения не имеется. На основании лабораторного опыта может быть определен процент удаления взвеси p, зависящий от глубины H и длительности отстаивания.

Скорость осаждения выражается в виде $v_s \simeq pt^n$. Величина n — мера флокуляционных свойств суспендированной взвеси (для гранулированных частиц $n = 0$). Кривая $H = f(t)$ в полулогарифмической шкале представляет прямую линию, откуда можно определить n.

Эффективную скорость осаждения v_s можно вычислить как отношение эффективной глубины H к времени, требуемому для получения заданного процента осаждения (рис. 3.10). Все ча-

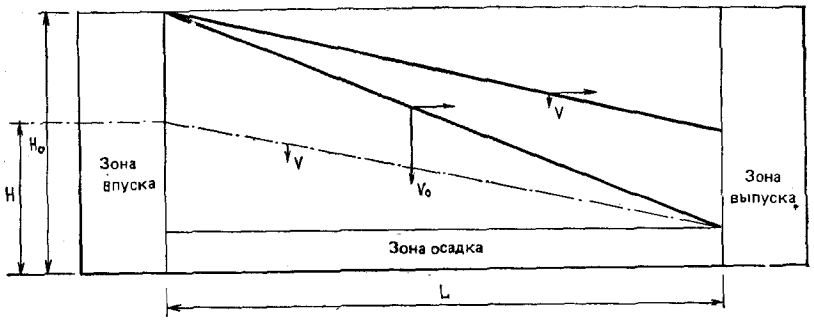


Рис. 3.8.

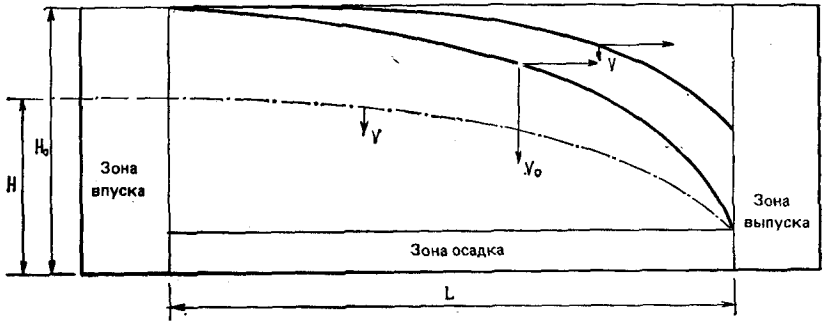


Рис. 3.9

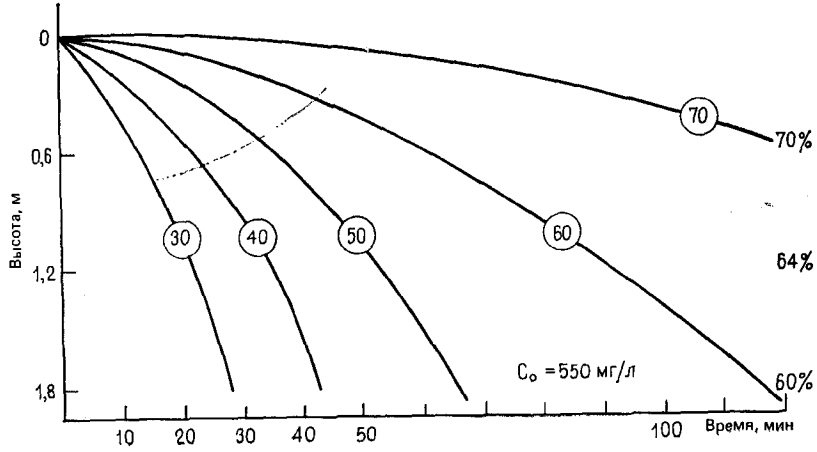


Рис. 3.10

стицы со скоростью осаждения не менее чем v_s будут удалены в идеальном осветлителе, имеющем поверхностную нагрузку, равную v_s.

Зонное осаждение флокулированных частиц типично для активного ила и флокулированной химической суспензии при концентрации выше 500 мг/л. Частицы слипаются, что обеспечивает зонное осаждение, при котором образуется поверхность раздела между хлопьями и иловой жидкостью.

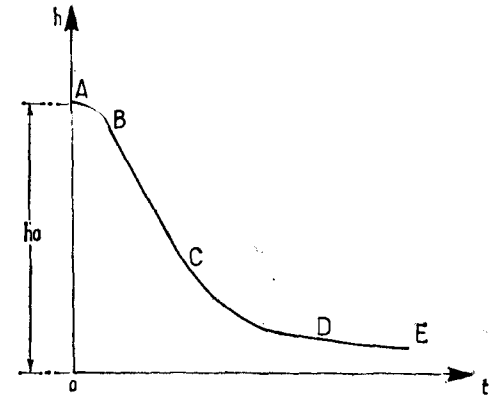


Рис. 3.11

Теория Кинша. Основные предположения сводятся к тому, что скорость падения частиц зависит только от местной концентрации частиц C. Для зонного осаждения в трубе с адекватной высотой и диаметром, когда измеряется глубина до верха слоя осадка в зависимости от времени, получаем кривую (рис. 3.11), на которой различаются фазы:

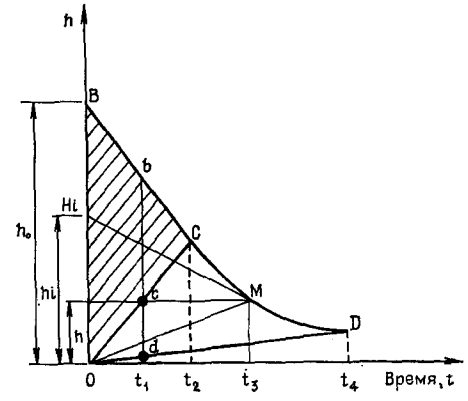


Рис. 3.12

● от A до B граница раздела определяется более или менее отчетливо: это фаза коалесцентной флокуляции, которая наблюдается не всегда;

● от B до C отрезок прямой, соответствующий постоянной скорости отстаивания v_0 (линейный градиент). Для трубки заданных размеров v_0 зависит от начальной концентрации сухого вещества и флокуляционных свойств суспензии. Если начальная концентрация C_0 увеличивается, то скорость осаждения v_0 уменьшается. Например, для активного ила городских сооружений с концентрацией от 1 до 4 г/л значение v_0 варьирует в пределах от 6 до 1,8 м/*ч*;

● вогнутый участок CD, соответствует постепенному уменьшению скорости движения верхней границы слоя осадка;

● от D и до конца частицы хлопьев приходят во взаимный контакт, что вызывает сжимающее действие на нижние слои.

Теория Кинша применима к измерению скорости падения частиц на участках BC и CD, которые охватывают важнейший диапазон осаждения, в частности, активного ила.

Рассмотрим суспензию, в которой при осаждении коалесцентная фаза отсутствует (рис. 3.12).

Вычисления показывают, что:

в треугольнике BOC концентрация и скорость падения постоянны и соответственно равны их начальным значениям в точке B;

в треугольнике COD линии равных концентраций прямые; они проходят через начало координат. Это означает, что с первого момента осаждения слои осадка, находящиеся у дна, приходят в контакт со всей взвесью, и концентрация в этих слоях изменяется от начальной до той, которая соответствует точке D, где начинается сжатие слоев. Слой осадка с глубиной t_1b при времени t_1, таким образом, имеет три различные зоны:

верхнюю bc, где концентрация и скорость снижения уровня осадка постоянны и остаются равными их начальным значениям C_0 и v_0;

промежуточную cd, где концентрация постепенно возрастает от c до d и соответственно этому скорость непрерывно уменьшается;

донную dt_1, где хлопья осадка контактируют между собой и подвергаются сжатию.

При некотором среднем значении времени t_2 верхняя зона исчезает, а при времени t_4 остается только донная зона.

Чтобы рассчитать концентрацию в точке M участка CD, нужно провести касательную к кривой в точке M до пересечения ее с осью ординат (в точке H_i). По глубине h_i можно вычислить концентрацию C_i для поверхности раздела фаз в точке M:

$$C_i = C_0h_0/h_i,$$

для которой соответственно скорость падения составляет $v_i = dh/dt$ (градиент от MH_i).

Средняя концентрация осадка после прохождения всей высоты h будет:

$$C = C_0h_0/h.$$

Практические выводы: три участка BC, CD и DE кривой Кинша (см. рис. 3.11) используют при проектировании следующих сооружений с зонным осаждением:

● отстойников и осветлителей (участок BC соответствует сооружениям с вертикальным движением потока, как с фиксированным (комбинированные тенки, см. с. 218), так и с взвешенным слоем осадка (пульсатор, см. с. 181); участок CD соответствует сооружениям с вертикальным или горизонтальным потоком, в которых желательно или необходимо уплотнение осадка (отстойники со скребковым устройством и осветлители, см. с. 168);

● концентраторов осадка, для которых используют участок DE (см. уплотнители, с. 464).

Индекс Мольмана. На кривой Кинша имеются особые точки, используемые для характеристики осадка: это ордината, соответствующая 30—40-минутному отстаиванию и указывающая объем осевшего осадка.

Определение массы M (г) взвешенных веществ в этом объеме V (см³) позволяет получить:

объемный индекс V/M — объем (см³), занимаемый 1 г осадка. Эта величина известна как индекс Мольмана $I_М$;

индекс плотности, $100\,M/V$ — масса в г 1 см³ осадка после $^1/_2$ ч отстаивания, или индекс Дональдсона $I_Д$

$$I_Д \cdot I_М = 100.$$

Эти характеристики нельзя соотнести с обычными физическими константами. Они легко измеряются и используются для расчета количества активного ила в очистных сооружениях.

Общие принципы проектирования отстойников и осветлителей. Площадь поверхности отстойного сооружения или осветлителя определяют на основании двух критериев: гидравлической нагрузки на поверхность [м³/(м²·сут)] и нагрузки по сухому веществу [кг/(м²·сут)].

Нагрузка на поверхность обусловлена скоростью седиментации взвешенных веществ. Уже было показано, что скорость может быть вычислена по закону Стокса для гранулированных частиц и должна быть измерена для частиц, подверженных флокуляции. Нагрузка по сухому веществу, очевидно, зависит от концентрации и определяет минимум площади поверхности, принимаемой для удаления заданного количества такого вещества. При проектировании отстойников или осветлителей принимается бóльшая из поверхностей, полученных на основании указанных двух критериев.

Нагрузка по сухому веществу не принимается во внимание, если концентрация вещества в осветляемой воде мала (при свободном и диффузном осаждении), но ее очень важно учитывать при зонном осаждении. В этом случае при расчете площади поверхности отстойника применяют индекс Мольмана, определяемый из нагрузки по массе.

Нагрузку по сухому веществу определяют так. В цилиндрический отстойник или осветлитель с поперечным сечением S подают поток с расходом Q_e и концентрацией взвешенных веществ C_e. Осадок в количестве Q_s с концентрацией сухого вещества C_s удаляют со дна отстойника.

Расход воды составляет $Q = Q_e - Q_s$.

Для баланса массы сухого вещества можно написать $Q_sC_s = Q_eC_e$.

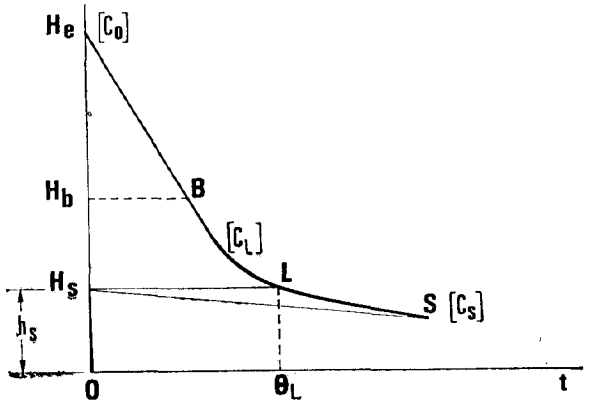


Рис. 3.13. Геометрическое определение максимальной площади поверхности (по теории Кинша)

В случае отстаивания в статическом отстойнике по кривой Кинша для любого уровня осадка можно определить скорость его снижения v_i и концентрацию взвеси C_i. Для такого уровня поток сухого вещества

$$F_i = C_i v_i.$$

В непрерывно действующем осветлителе скорость осаждения взвеси возрастает на величину v_f движения жидкости. У дна отстойного бассейна поток сухого вещества F_s равен

$$C_s v_f = Q_s C_s / S.$$

Для любого уровня i в зоне осадка, где концентрация взвеси C_i, а индивидуальная скорость осаждения частиц v_i, поток сухого вещества $F_i = C_i(v_i + v_f)$.

При определенном уровне L имеется критическая концентрация C_L, для которой необходимо иметь максимум площади S_m, чтобы предотвратить проскок осадка и обеспечить удовлетворительные условия удаления осадка. Поток на этом уровне не должен превышать значения F_L и площадь осветлителя должна быть не менее

$$S_m = Q_e C_e / F_L.$$

Определение уровня критической концентрации C_L для достижения концентрации удаляемого осадка C_s по кривой Кинша показано на рис. 3.13.

Для равных потоков математические вычисления дают:

$$F = \frac{Q_e C_e}{S} = (v_L + v_f) C_L = \frac{Q_e C_e}{S} \cdot \left(\frac{1}{C_s} + v_L \right) C_L,$$

где v_L — средняя скорость в точке L.

Нагрузку по сухому веществу рассчитывают по формуле

$$Q_e C_e / S = v_L / (1/C_L - 1/C_s).$$

Имеются две возможные альтернативы:

а) L лежит ниже точки B (справедливо для концентратора и уплотнителя):

$$\frac{QC_e}{S} = \frac{h_0 - h_s}{\theta_L \left(\frac{1}{C_L} - \frac{1}{C_s} \right)} = \frac{v_L}{\frac{1}{C_L} - \frac{1}{C_s}},$$

где θ_L — абсцисса точки L; v_L — скорость оседания в точке L.

Максимальная нагрузка в соответствии с вариациями (колебаниями) откачки осадка с концентрацией C_s равна той, которая обусловлена балансом скорости осаждения, соответствующей углу наклона линии HeL.

б) L находится выше точки B (обычно для осветлителя):

$$\frac{QC_e}{S} = \frac{v_0}{\frac{1}{C_e} - \frac{1}{C_s}} \simeq \frac{C_e h_e}{\theta_e},$$

где θ_e — абсцисса точки S.

Факторы, учитываемые при проектировании. В практике нет идеального осветлителя. В жидкости наблюдаются вихревые явления: на поверхности ее могут появляться волны из-за действия ветра, а также конвекционные потоки из-за локальных перепадов температуры (в особенности под действием солнца) и плотности.

Можно попытаться получить ламинарную и устойчивую циркуляцию путем подбора значений чисел Рейнольдса и Фруда. Число Рейнольдса должно быть небольшим; его вычисляют по формуле

$$\mathrm{Re} = vr/\nu,$$

где v — скорость движения воды; r — гидравлический радиус (площадь поверхности, разделенная на смоченный периметр); ν — кинематическая вязкость воды: $1{,}01 \cdot 10^{-6}$ м²/с при 20° С).

Число Фруда характеризует постоянство процесса циркуляции, когда поток подвержен действию преимущественно сил гравитации и инерционных сил:

$$\mathrm{Fr} = v/\sqrt{rg},$$

где v и r имеют те же значения, что и для Re, $g = 9{,}81$ м/с².

При большей стабильности циркуляции и большей однородности скорости движения по всей площади сооружения имеют место и лучшие гидравлические условия работы. Стабильная циркуляция соответствует высокому значению числа Фруда.

Для практических целей может быть определено отношение H/L или H/R,

где H — глубина жидкости в прямоугольном осветлителе длиной L или круглом в плане сооружении радиусом R.

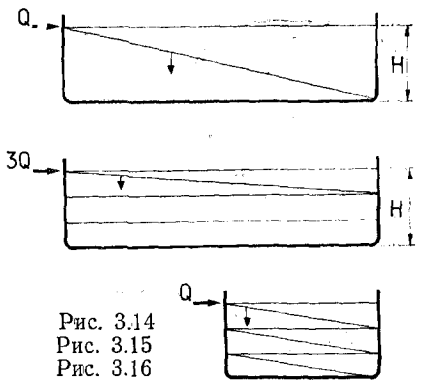


Рис. 3.14
Рис. 3.15
Рис. 3.16

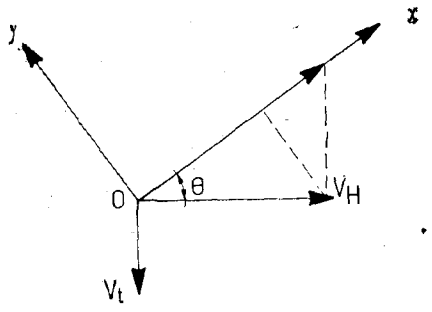


Рис. 3.17

Принимая длительность пребывания в сооружении равной 2 ч, получим по Шмидту-Брегсу:

для прямоугольного осветлителя

$$1/20 > H/L > 1/35;$$

для круглого в плане сооружения

$$1/6 > H/R > 1/8.$$

Эксплуатационные и гидравлические условия работы сооружения имеют важное значение. Можно запроектировать осветлитель таким образом, чтобы обрабатываемая вода проходила вертикально через слой осадка, причем последний будет играть роль фильтрующего материала. Поэтому для расчета таких осветлителей некоторые авторы применяют формулы, разработанные для фильтров с пористой загрузкой (уравнение Кармана — Козени).

Полочные отстойники и осветлители. Старая идея использования полочных конструкций получила снова большую популярность. Она базируется на том, что нагрузка на поверхность осветлителя со свободным осаждением не должна зависеть от его высоты и что основная схема, показанная на рис. 3.14, может быть заменена:

схемой (рис. 3.15), где расход Q может быть увеличен в число раз, равное числу элементарных осветлителей n;

схемой (рис. 3.16), где для заданного расхода Q длина исходного осветлителя может быть уменьшена в n раз.

Рассмотрим систему параллельных пластин, находящихся внутри осветлителя. В системе координат Ox, Oy, Oz примем: Ox параллельна линии наклона пластины; Oy образует прямой угол с линией наклона, а Oz образует прямой угол с поверхностью Oxy (рис. 3.17); θ — угол, образуемый осью Ox и горизонтальной осью.

Допустим, что v_t — скорость вертикального падения частицы (например, по закону Стокса). Поток жидкости предполагается ламинарным и неизменным по направлению.

● Жидкость движется в прямом направлении Ox (противоточный отстойник или в обратном (прямоточный отстойник).

ТАБЛИЦА 3.4

	Круглые трубы	Параллельные пластины
A	8	6
S_c	4/3	1

Основное уравнение для расчета полочного осветлителя:

$$\mu/v_0 = A\,(Y - Y^2),$$

$$S_c = \frac{v_t}{v_0}\,(\sin\theta + L\cos\theta),$$

где

μ — скорость жидкости в заданной точке в направлении x (рис. 3.18); v_0 — средняя скорость потока в направлении x; L — отношение l/d (l — длина пластины в направлении потока); d — глубина жидкости, измеренная под прямым углом к направлению движения; $Y = y/d$ — ордината траектории в направлении y; v_t — скорость осаждения частицы, имеющей траекторию такую, при которой частица будет удалена (осядет); A — коэффициент, значение которого зависит от конструкции системы; S_c — параметр, характеризующий систему (табл. 3.4).

При проектировании полочных осветлителей за основу можно взять поверхностную нагрузку, вычисленную по формуле

$$\text{Поверхностная нагрузка} = CK\frac{v_0}{L},$$

где

$$K = S_c\frac{L}{\sin\theta + L\cos\theta},$$

$$C = 8{,}64 \cdot 10^{-2}.$$

Если v_0 в этой формуле принять в см/с, то поверхностную нагрузку следует выразить в $м^3/(м^2 \cdot сут)$.

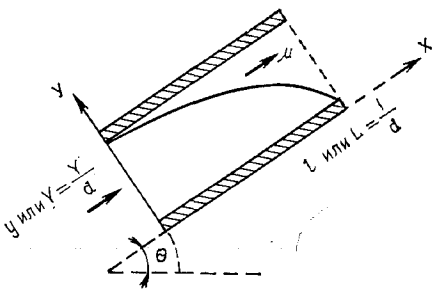
Для осадка с данными свойствами следует изучить влияние различных параметров, в частности L и θ.

Скорость движения жидкости может быть положительной (как, например, в пульсаторах, оборудованных пластинами) или отрицательной (как в осветлителях полочного типа).

● Жидкость движется в направлении Qz. Например, многополочный осветлитель, где $\theta = 0$.

3.1.1.4. Флотация основана на разности плотностей взвешенных твердых частиц или капель жидкости и жидкости, в которой они суспендированы. Но в противоположность процессам отстаивания этот метод разделения фаз применяют только к таким частицам, истинная или кажущаяся плотность которых (соответственно «спонтанный» или «стимулированный» процесс фло-

Рис. 3.18. Траектория частицы



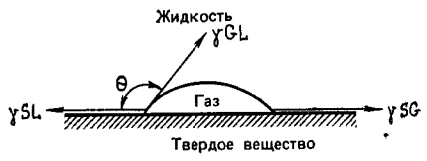


Рис. 3.19

тации) меньше плотности жидкости, в которой они находятся.

Стимулированная флотация основана на способности определенных твердых частиц, а также частиц жидкости соединяться с пузырьками газа (обычно воздуха), образуя комплексы «частица — газ», плотность которых меньше, чем у жидкости, в которой они образуют дисперсную фазу.

В результате действия сил (тяжести, всплывания и сопротивления) комплексы «частица — газ» поднимаются и образуют концентрированный слой на свободной поверхности жидкости, с которой затем удаляются.

Выделение путем флотации твердых или жидких частиц с плотностью, большей плотности дисперсионной среды, возможно при условии, если адгезия между частицами и микропузырьками больше, чем смачивающее действие жидкости на частицы. Степень смачивания твердого вещества жидкостью определяется величиной угла контакта θ между поверхностью твердого вещества и пузырька газа (см. рис. 3.19):

если $\theta = 0$, то твердое вещество полностью смачивается жидкостью и адгезия между твердой и газовой фазами невозможна;

если $\theta = 180°$, то твердое вещество не смачивается, что обусловливает оптимальный контакт между твердой и газовой фазами. Фактически это — экстремальный случай, который никогда не встречается на практике, так как ни одна из жидкостей не образует угла θ более 110°;

между этими двумя значениями адгезия в комплексе «твердая частица — газ» возрастает с увеличением значения угла θ.

Такой подход к измерению смачиваемости частиц применим в том случае, если их формы, будь то твердые частицы или частицы жидкости (масло), относительно просты и если их природа хорошо известна. Что касается флокулированных частиц, к поверхностным явлениям добавляются механические, связанные со структурой хлопка и, в особенности, с газом, включенным в хлопок.

Комплекс «частица — газ» быстро достигает постоянной максимальной скорости подъема, которую как и для процесса оседания вычисляют по обычной формуле Ньютона (см. с. 70) и

в которой для условий всплывания принимают d — диаметр комплекса «частица — газ»; ρ_s — действительная плотность комплекса «частица — газ». В зависимости от значения числа Рейнольдса можно рассчитать такую систему, в которой максимальная скорость подъема задается особыми формулами Стокса (ламинарный поток), Аллена (промежуточные условия потока) или Ньютона (турбулентные условия). Формула Стокса

$$v = \frac{(\rho_e - \rho_s)\, g d^2}{18\eta},$$

применяемая к пузырькам воздуха в воде при 20° С, показывает, что условия ламинарного режима хорошо сохраняются для пузырьков с диаметром менее 120 мкм. Поэтому их максимальная скорость 30 м/ч. Он соответствует экстремальному случаю, если разность $(\rho_e - \rho_s)$ максимальна. Это уравнение описывает влияние различных факторов: скорость изменяется в зависимости от d^2 $(\rho_e - \rho_s)$ и температуры жидкости, последняя сказывается на вязкости.

Необходимо также принимать во внимание форму комплекса «частица — газ». В вышеприведенных уравнениях Стокса и Ньютона форма принята в виде шара. Учитывая эти поправочные факторы, которые легко определить для простых геометрических форм, получаем более низкие значения скорости, чем для шара.

Благоприятное влияние диаметра или размера комплекса «частица — пузырек» газа не может быть оставлено без внимания, когда речь идет о флотации частиц более тяжелых, чем вода. Удельная площадь поверхности, т. е. отношение

$$\frac{\text{площадь поверхности}}{\text{объем}} \text{ или } \frac{\text{площадь поверхности}}{\text{масса}},$$

уменьшается, если диаметр увеличивается. Если подавать одинаковое количество воздуха на единицу площади поверхности, то в результате фактор $(\rho_e - \rho_s)$ уменьшится. Два параметра, таким образом, противопоставляются один другому.

Минимальный объем газа V_g с плотностью ρ_g, необходимый для флотации частиц массой S и плотностью ρ_p из жидкости, имеющей плотность ρ_l, определяется выражением

$$\frac{V_g}{S} = \frac{\rho_p - \rho_l}{\rho_l - \rho_g} \cdot \frac{1}{\rho_p}.$$

3.1.1.5. Фильтрование — процесс, в котором смесь твердых и жидких веществ проходит через пористый материал (фильтр), задерживающий твердые вещества и позволяющий жидкости (фильтрату) пройти сквозь него. Если размеры частиц суспендированного вещества больше размера пор, то оно останется на поверхности фильтра; такое фильтрование известно как поверхностное, осадочное или опорное. Если твердое вещество остает-

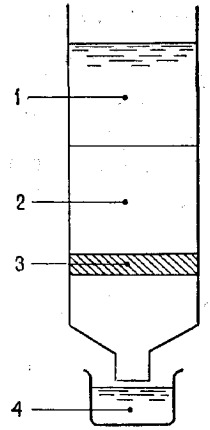


Рис. 3.20

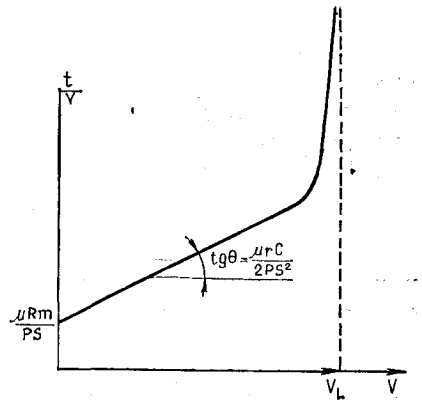


Рис. 3.21

ся внутри пористой массы, процесс называется фильтрованием в объеме или в глубине. В обоих случаях поток жидкости, проходящий через пористую среду, подчиняется закону Дарси, согласно которому потери напора P пропорциональны скорости фильтрования v (отношение поступающего расхода Q к единице площади поверхности), с коэффициентом пропорциональности k, зависящим от динамической вязкости η и сопротивления среды R:

$$v = P/\eta R = kP.$$

Поверхностное фильтрование. Рассмотрим процесс фильтрования жидкости, содержащей взвесь *1*, через матерчатый или подобный материал с образованием кека *2* (рис. 3.20).

В соответствии с законом Дарси R представляет сумму двух величин: сопротивления R_g кека и начального сопротивления R_m фильтрующего материала *3*

$$R = R_g + R_m,$$

$$\text{где } R_g = r\frac{M}{S} = r\frac{W_V}{S},$$

где M — общая масса отложившегося кека; W — масса кека на единицу объема фильтрата; V — объем фильтрата по истечении заданного времени t; S — площадь поверхности фильтра; r — удельное сопротивление фильтрованию кека при давлении P.

Отсюда

$$v = \frac{1}{S}\frac{dV}{dt} = \frac{P}{\eta\left(r\frac{W_V}{S} + R_m\right)}.$$

Интегрирование приводит к уравнению типа

$$t = av^2 + bv,$$

$$\text{где } \frac{t}{v} = av + b; \quad a = \frac{\eta r W}{2PS^2}; \quad b = \frac{\eta R_m}{PS}.$$

Графически это уравнение выражается прямой линией, позволяющей определить значение r через величину $a = \operatorname{tg}\theta$ (рис. 3.21).

$$W = \frac{W_b}{1 - \frac{W_b}{W_g}},$$

$$\text{где } W_b = \frac{\text{масса сухого вещества}}{\text{плотность осадка}};$$

$$W_g = \frac{\text{масса сухого вещества}}{\text{плотность кека}}.$$

Примечание. Такое интегрирование справедливо в случае, если r остается постоянным в течение всего процесса — условие, которое полностью сохраняется только при несжимаемых осадках.

Если фильтрование определенного объема осадка продолжать достаточно долго, то через некоторое время прямая зависимость (см. рис. 3.21) нарушается, после чего степень обезвоживания увеличивается очень медленно до тех пор, пока не достигнет предельной величины.

Значение r увеличивается с ростом давления согласно закону, записанному в виде выражения $r = r_0 + r'P^s$, в котором r_0 и r' соответственно пределы удельного сопротивления при $P = 0$ и $P = 0{,}1$ МПа; s — коэффициент сжимаемости осадка, величина безразмерная; r — коэффициент фильтруемости или удельное сопротивление, выраженное в м/кг.

Для сравнения различных осадков обычно используют удельное сопротивление $r_{0,5}$, измеренное при давлении 49 кПа.

Фильтрование через пористый слой может осуществляться на поверхности слоя и внутри него. Тип фильтрования (на поверхности или в глубине) определяют, пользуясь размерным критерием

$$\varepsilon = \frac{18P}{R_m d^2 (s - e)},$$

где P — потери напора в слое, сопротивление которого R_m; d — диаметр задержанных частиц.

Если $\varepsilon < 100$, фильтрование будет поверхностным, $\varepsilon > 1000$, фильтрование в слое, а при $100 < \varepsilon < 1000$ — фильтрование поверхностное и в слое.

Фильтрование в слое. Математически анализируют результаты следующих трех начальных уравнений:

Айзена

$$dC/dl = FC \text{ (справедливо в первом приближении)} \qquad (1)$$

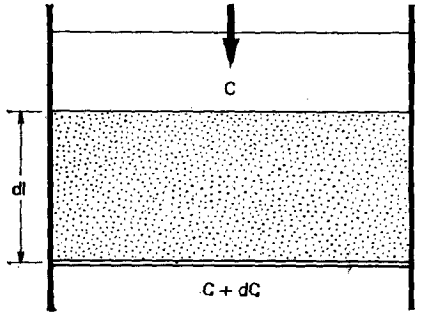


Рис. 3.22

Дарси

$$dP/dl = kV, \qquad (2)$$

где C — концентрация взвеси в воде; v — скорость фильтрования, вычисленная по отношению к площади поверхности, расположенной под прямым углом к направлению потока; l — расстояние от какого-либо разреза фильтра до входа; k — коэффициент Дарси; F — коэффициент фильтрации; P — потери напора.

Уравнения материального баланса. В слое фильтра глубиной dl и площадью S, C — концентрация взвеси в поступающем потоке и $C+dC$ — в выходящем потоке (рис. 3.22).

Пусть q — это масса материала, остающегося в единице объема тела фильтра. Материальный баланс выражается следующим уравнением:

$$SVdtC = SVdt\,(C + dC) + Sdldq,$$

которое приводится к виду

$$-\frac{dC}{dl} = \frac{1}{V}\frac{dq}{dt}. \qquad (3)$$

Пользуясь уравнениями (1) и (3), можно определить грязеемкость фильтра и концентрацию взвеси в отфильтрованной воде. Уравнение (2) дает возможность вычислить потери напора.

Трудность использования формул состоит в том, что коэффициенты F и k зависят от степени засорения. На изменение этих коэффициентов предположительно влияют засоренность фильтра, качество фильтрата и потери напора.

Коэффициент фильтрации F изменяется от начального значения F_0 до 0. Между этими двумя величинами возможна линейная зависимость

$$F = F_0\left(1 - \frac{q}{q_1}\right),$$

где q — степень засоренности фильтрующей среды (масса задержанного вещества в единице объема фильтра) и q_1 — максимальное значение q.

После интегрирования уравнений (1) и (3) получаем

$$\frac{q}{q_0} = \frac{1 - e^{-At}}{1 + e^{-At}\left(e^{F_0 l} - 1\right)}, \qquad (4)$$

где $A = F_0 V C_0/q_1$.

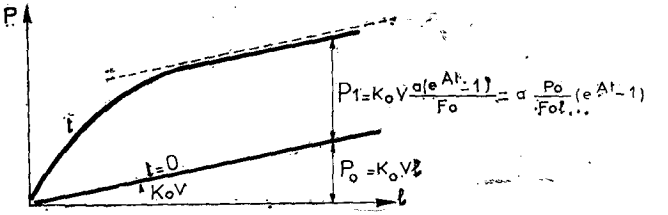


Рис. 3.23

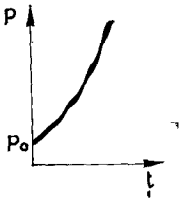


Рис. 3.24

Если L — глубина фильтрующего слоя, тогда

$$C_L = \frac{C_0}{1 - e^{-At}\left(e^{F_0 l} - 1\right)}. \qquad (5)$$

Если требуется, чтобы фильтрат имел концентрацию, не превышающую заданного значения C_{L1}, то t может быть вычислено из вышеприведенного уравнения, если остальные факторы известны.

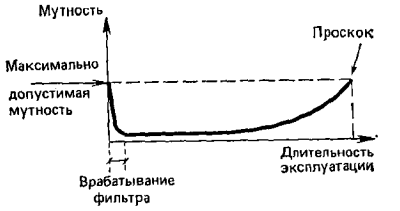


Рис. 3.25

Предполагается, что коэффициент Дарси k изменяется в соответствии с уравнением

$$\frac{k}{k_0} = \frac{1 + \left(a - 1\right)\frac{q}{q_1}}{1 - \frac{q}{q_1}}. \qquad (6)$$

После интегрирования уравнение Дарси примет вид

$$P = k_0 V\left[1 + \frac{a\left(e^{At} - 1\right)}{F_0}\left(1 - e^{F_0 l}\right)\right]. \qquad (7)$$

Уравнение состоит из двух слагаемых, одно из которых соответствует потоку, проходящему через незагрязненные поры $k_0 V1$, другое — потоку через загрязненный фильтр (рис. 3.23 и 3.24).

Уравнение (7) дает возможность изучить кривые потерь напора и степени засоренности. Оно также позволяет вычислить время t, в течение которого достигается максимальное значение потерь набора P_{max}.

Качество фильтрата в течение фильтроцикла изменяется (рис. 3.25). Вначале мутность уменьшается (в период, соответствующий времени «врабатывания» фильтра), затем остается постоянной некоторое время, прежде чем начнет увеличиваться и достигнет точки «проскока». Время t_1, в течение которого получается вода требуемого качества, и время t_2, за которое до-

стигается максимальная проектная величина потерь напора, изменяются в очень широких пределах.

На эти значения t_1 и t_2 влияют следующие факторы:

качество и количество взвеси в обрабатываемой воде, которое в свою очередь определяется фактором когезии K и объемом осадка V, задержанным после 24 ч седиментации;

размер зерна фильтрующего материала, определяемый по его эффективному диаметру D, мм;

скорость фильтрования $v = \frac{V}{S}$, м/ч;

глубина L фильтрующего слоя, м;

изменения потерь напора, выраженные в м.

При идеальном фильтре $t_1 = t_2$. Фактически допустимо для надежности принять $t_1 > t_2$.

3.1.2. УДАЛЕНИЕ РАСТВОРЕННЫХ ВЕЩЕСТВ

3.1.2.1. Мембранная сепарация. *Полупроницаемые мембраны: ультрафильтрация — обратный осмос.* Техника разделения растворов с помощью мембраны под действием давления известна уже около 100 лет. Однако только в 60-х годах началось промышленное применение методов мембранной сепарации, вызванное к жизни созданием синтетических мембран. Эти методы, в которых используются свойства полупроницаемости определенных мембран (проницаемых для воды и некоторых растворенных веществ, но непроницаемых для других растворенных веществ и взвешенных частиц), представляют собой развитие процессов классического фильтрования в направлении применения тонкой и тончайшей сепарации. Так, за простым фильтрованием (см. гл. 3, с. 82), при котором выделяются частицы с диаметром более 5 мкм (как, например, в случае фильтрования через слой песка), следуют:

1) микрофильтрование, при котором выделяются частицы диаметром больше нескольких мкм (фильтрация через мембраны Миллипор, Сарториус и подобных же типов);

2) ультрафильтрация, в процессе которой выделяются молекулы с молярной массой от 10 до 100 кг/моль в зависимости от используемой мембраны;

3) обратный осмос, известный также под названием гиперфильтрации, который выделяет ионы и молекулы с молярной массой в несколько сотен граммов на моль.

Имеются два основных признака, по которым фильтрование и микрофильтрование отличаются от обратного осмоса и ультрафильтрации.

а) Микрофильтрование не изменяет химических свойств раствора, между тем в двух других процессах выделение растворенных примесей изменяет химический потенциал и создает градиент, при котором возникает тенденция диффундирования выделенного вещества в обратном направлении. Чтобы привести систему в состояние равновесия, необходимо воспрепятствовать этой реверсионной диффузии путем наложения давления на «фильтруемую» жидкость. Установленная в условиях равновесия разность давлений известна как осмотическое давление системы.

Простое уравнение связывает осмотическое давление с концентрацией

$$\pi = \Delta CRT,$$

где ΔC — разность концентраций, моль/м³; R — универсальная газовая константа, равная 8,314 Дж/(моль·К); T — температура, К; π — осмотическое давление, Па.

Пример. Концентрация раствора: 100 кг/м³; $T = 300$ К; для вещества с молярной массой 0,050 кг/моль, $C = 100/0{,}050$,

$$\pi = \frac{100}{0{,}050} 300 \times 8{,}314 = 50 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Аналогичным образом, для вещества с молярной массой 0,5 кг/моль

$$\pi = 5 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

для вещества с молярной массой 5 кг/моль

$$\pi = 5 \cdot 10^4 \text{ Па};$$

для вещества с молярной массой 50 кг/моль

$$\pi = 5 \cdot 10^3 \text{ Па}.$$

Очевидно, чем меньше молекулы (т. е. чем меньше молярная масса), тем выше возникающее осмотическое давление при той же разнице концентраций. Это объясняет причину меньшего роста обратного осмотического давления при ультрафильтрации, чем при обратном осмосе.

б) При фильтровании и микрофильтровании вся обрабатываемая жидкость проходит через фильтрующее устройство. Взвешенные частицы остаются на материале фильтра. При достаточно длительном времени использования фильтр очищается механически либо «забитую» мембрану заменяют другой.

В случае обратного осмоса и ультрафильтрации кроме нерастворенных частиц на мембранах задерживаются также молекулы и ионы раствора. Концентрация последних в непосредственной близости от мембраны вызывает «поляризацию» (рис. 3.26), что способствует росту осмотического давления, за которым иногда следует осаждение. Эти трудности можно устранить следующим путем:

пропустить через мембрану только часть объема обрабатываемого раствора и непрерывно удалять «вредный» поток, который содержит ионы и молекулы, задерживаемые мембраной;

использовать избыточное против теоретического давление;

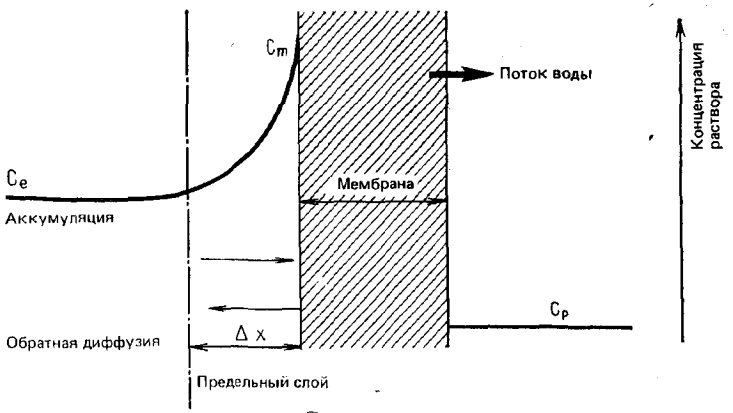


Рис. 3.26. Коэффициент поляризации, равный $\frac{C_m}{C_e}$

практически применяют давление от 0,2 до 0,6 МПа при ультрафильтрации и от 2 до 8 МПа при обратном осмосе.

Следует заметить, что в противоположность фильтрованию и микрофильтрованию, не существует теории, которая была бы полностью пригодна для оценки эксплуатационных характеристик мембран, используемых для обратного осмоса и ультрафильтрации.

Из множества предложенных математических и физических моделей процесса наибольшее признание получили следующие.

Ультрафильтрация включает пористую среду, в которой задерживаются растворенные вещества обрабатываемой воды, если размеры их молекул превышают размеры пор, через которые пропускается раствор. Концентрация ультрафильтрата зависит как от расхода воды, проходящей через поры (и, следовательно, зависит от вязкости, определяемой температурой), так и от концентрации C_m жидкости, соприкасающейся с мембраной. Концентрация C_m является функцией исходной концентрации обрабатываемой жидкости C_e:

$$C_m = \psi C_e,$$

где ψ представляет собой коэффициент поляризации.

Коэффициент поляризации может быть уменьшен до минимума максимально эффективной очисткой поверхности мембраны, которая позволяет удалить с частью сбрасываемого потока частицы, имеющие тенденцию аккумулироваться на мембране (см. рис. 37).

При обратном осмосе предложенная модель не всегда согласуется с наблюдаемыми явлениями. Предполагают, что осмотическая мембрана представляет собой непористый барьер для диффузии. Перенос в ней осуществляется путем растворения некоторых молекул раствора внутри мембраны и диффузии их (и растворенного вещества и растворителя) под влиянием градиентов концентрации и давления, которые в свою очередь изменяют химический потенциал μ раствора в веществе мембраны.

Основное уравнение для составляющей i потока J и мембраны толщиной e имеет вид:

$$y_i = -\frac{D_i C_i}{RT}\left(\frac{\partial \mu_i}{\partial C_i}\ \overline{\text{град}}\ C_i + \frac{\partial \mu_i}{\partial P}\ \overline{\text{град}}\ P\right),$$

где D_i — коэффициент диффузии, составляющей i; C_i — концентрации i в мембране; P — давление.

Для систем водных растворов интегрирование этого уравнения, если предположить, что D_i не зависит от C_i и свойства мембраны не зависят от давления, дает для воды:

$$y_{\text{воды}} = -\frac{D_e C_e v_e}{RT}\left(\frac{\Delta P - \Delta\pi}{e}\right),$$

или для заданной температуры, а также с учетом практически одинаковой концентрации воды по обе стороны мембраны

$$y_{\text{воды}} = A\frac{\Delta P - \Delta\pi}{e}; \qquad (1)$$

для раствора

$$y_s = -\frac{D_s C_s}{RT}\frac{\Delta C_m}{e},$$

где C_m соответствует концентрации в мембране.

Полагая, что при равновесных условиях коэффициент распределения C_p между концентрацией внутри мембраны и концентрацией на поверхности мембраны постоянный, имеем:

$$y_{\text{sol}} = B\frac{C_m - C_p}{e}. \qquad (2)$$

Величины A и B названы константами проницаемости мембраны соответственно по отношению к воде и раствору.

Эффективность R можно выразить в следующем виде:

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_e} = 1 - \frac{C_p}{C_m}\cdot\frac{C_m}{C_e} = 1 - \psi\frac{C_p}{C_m} = 1 - \psi + \frac{J_e}{BC_e} \qquad (3)$$

и перенос соли как

$$SP = 100\frac{C_p}{C_e} = 100\left(\psi - \frac{J_e}{BC_e}\right). \qquad (4)$$

Мы снова убеждаемся в важности коэффициента поляризации ψ.

Уравнения (1), (2) и (3) или (4), индивидуальные для каждого типа мембран, дают возможность предсказать направление, в котором будут меняться характеристики осмотической системы в зависимости от изменения параметров, оказывающих

на нее влияние. Например, при прочих равных условиях увеличение давления позволит увеличить расход воды (уравнение 1), но перенос солей (уравнение 2) остается неизменным (чтобы ψ оставался постоянным, необходимо увеличивать поток воды, очищающий мембрану). Качество обработанной воды вследствие этого ухудшается.

Мембраны для диализа. В отличие от полупроницаемых мембран диализные мембраны водонепроницаемы, но пропускают либо все ионизированные частицы, либо частицы определенного знака (катионы, если мембраны катионные, и анионы, если они анионные) под действием разности химических потенциалов растворов по обе стороны мембраны. Эта разность может быть обусловлена разностью: концентраций (простой диализ), давлений (пьезодиализ), электрических потенциалов (электродиализ).

Мембраны обычно делают из материалов, которые похожи на используемые в ионном обмене (см. гл. 10); некоторые свойства их близки к свойствам материалов для ионного обмена (например, чувствительность анионных мембран к растворенным органическим веществам). Если эти мембраны обладают селективностью действия, то мы сталкиваемся с явлениями концентрационной поляризации (вследствие аккумуляции посторонних ионов), описанными выше, которые противодействуют переносу ионов в желаемом направлении. Необходимо также обеспечивать эффективную гидравлическую очистку мембран (см. гл. 12).

3.1.2.2. Адсорбция обусловлена способностью некоторых веществ удерживать на своей поверхности молекулы органических веществ, экстрагируемых из жидкой или газовой фаз, в которых они находились. Явление относится к массопереносу из жидкой или газовой фазы на поверхность твердого вещества, с которым органическое вещество имеет сродство и энергию которого можно измерить путем микрокалориметрирования. Как и во всех остальных явлениях, связанных с массопереносом, адсорбционная емкость адсорбента по отношению к данному веществу зависит:

- от доступной площади поверхности материала; у природных адсорбентов (глин, цеолитов и т. п.) площадь удельной поверхности мала (от 50 до 200 м^2/г) и их адсорбционная емкость поэтому низкая, но несмотря на это они играют важную роль в природе. У промышленных адсорбентов площадь удельной поверхности может достигать 300 м^2/г, а у активных углей высокого качества — 1000—1500 м^2/г;
- от концентрации органического вещества в растворе. При определенных условиях устанавливается равновесие между концентрацией раствора и массой примесей, адсорбированных единицей площади поверхности (или единицей массы адсорбента). Это равновесие может быть выражено в виде уравнения Фрейндлиха:

$$x/m = C^{1}/^{n}K,$$

где x/m — масса примесей, приходящихся на единицу массы адсорбента; C — остаточная концентрация жидкости в условиях равновесия; K и n — константы при данной температуре, откуда возникло название соответствующих кривых — изотермы (рис. 3.27);

- от гидродинамических характеристик обмена, относительной скорости двух фаз и, в частности, от длительности контакта между твердой и жидкой фазами;
- от энергии связей, т. е. от сродства поверхности к органическому веществу, а следовательно, и от природы вещества, которое адсорбируется. В свою очередь это сродство часто зависит от pH. Во многих случаях кислая среда способствует адсорбции на активном угле.

Механизм образования связей весьма сложен и раскрыт еще не полностью. Действующие силы представляют собой результат сложения чисто физических сил (силы Ван-дер-Ваальса) в совокупности с химическими силами (отсюда важное значение имеет характер химических групп, присутствующих на поверхности адсорбента). Этой сложностью объясняется отсутствие достаточных основ для предсказания относительного сродства адсорбента и адсорбата.

3.1.2.3. Ионный обмен. Нерастворимые гранулированные ионообменные вещества имеют в своей молекулярной структуре кислотные или основные активные ионные группы с фиксированными положительными или отрицательными ионами, способными замещаться ионами того же знака из раствора, находящегося в контакте с ионообменным веществом. Такая замена происходит без существенных изменений физических свойств ионообменных веществ и без их растворения. Этот процесс, называемый ионным обменом, позволяет заменить ионы обрабатываемой жидкости без изменения общего числа ионов, присутствовавших в ней до обмена.

Первые ионообменные материалы были природного происхождения; затем появились синтетические минеральные вещества (альгинаты, кремнезем) и органические вещества; эти последние применяются сейчас почти исключительно под названием смол. Термин неверно распространен на смолы любого рода.

Основные реакции ионного обмена:

Обратимая реакция, используемая при умягчении,

$$RNa_2 + Ca^{2+} \rightleftharpoons RCa + 2Na^{+}.$$

Подобно любому химическому равновесию она подчиняется закону действия масс, при этом реакция в обратном направлении соответствует регенерации ионообменного вещества. Если обрабатываемая жидкость находится в состоянии статического

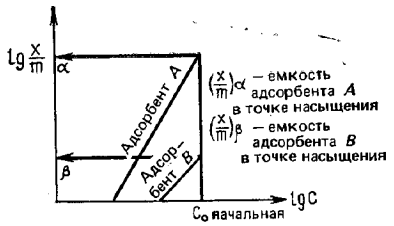


Рис. 3.27

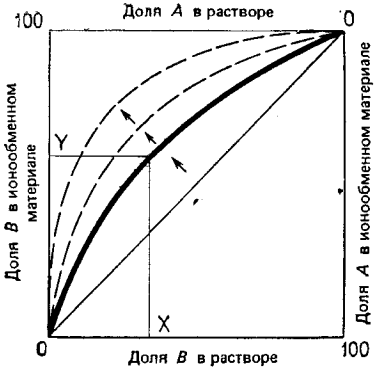


Рис. 3.28

контакта с ионообменным веществом, то реакция закончится по достижении равновесия между жидкостью и смолой.

Для наиболее полного обмена необходимо при фильтровании воды создавать несколько последовательных равновесных стадий через сменяющие друг друга слои обменного материала. Всегда происходит некоторая потеря ионов, которую желательно уменьшить.

Законы, описывающие обратимый ионный обмен: для каждой реакции с двумя ионами A и B равновесие между соответствующими концентрациями A и B в жидкости и в ионообменном веществе может быть определено графически (рис. 3.28).

В условиях равновесия, если концентрация B в растворе равна X%, то концентрация насыщения в ионообменном веществе составляет Y%.

Если два иона A и B имеют одинаковое сродство к ионообменному материалу, то равновесная кривая будет представлять собой диагональ квадрата. Чем выше степень сродства ионообменного материала к иону B, тем больше будет изогнута кривая (показано стрелками).

Форма кривой для данной системы двух ионов зависит от большого числа факторов: природы и валентности ионов, концентрации ионов в жидкости, характера ионообменного материала. В системе $Ca^{2+} \rightleftarrows 2Na^{+}$ с сульфированным полистиролом последний имеет большее сродство к ионам кальция, чем к ионам натрия; этот эффект будет тем заметнее, чем сильнее разбавлен раствор (см. рис. 3.28).

Как отмечено выше, в условиях статической обработки, после приведения в контакт жидкости и ионообменного материала, достигается стабильное состояние, соответствующее определенной точке на кривой. Если же обработка проводится непрерывно до тех пор, пока один из ионов не будет полностью удален, точка на кривой будет непрерывно перемещаться. При прохождении жидкости через серию слоев ионообменного материа-

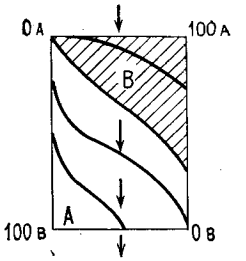


Рис. 3.29

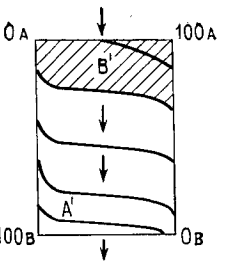


Рис. 3.30

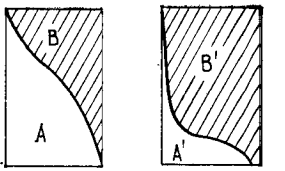


Рис. 3.31

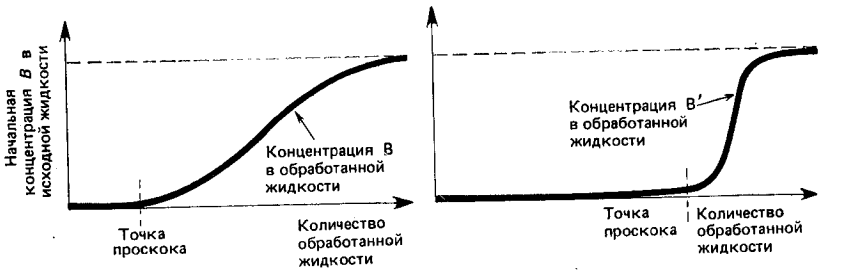


Рис. 3.32

ла содержание удаляемого иона становится в них все меньше и меньше и при движении точки вдоль равновесной кривой может быть достигнуто нулевое значение концентрации для удаляемого иона.

Если мы имеем слой обменного материала в форме A и если жидкость, содержащая ион B, пропускается через этот слой, то сменяющие последовательно друг друга состояния равновесия дадут серию кривых изохронных концентраций, представленных на рис. 3.29 для двух ионов одинакового сродства и на рис. 3.30, когда ионообменный материал имел значительно большее сродство к иону B, чем к иону A. «Точка проскока» достигается в тот момент, когда изохронная кривая сдвигается влево от правой вертикальной оси (положительная концентрация B в последнем слое, через который проходит жидкость). В это время кривые для двух случаев различного сродства выглядят, как показано на рис. 3.31.

Если площадь $B/(A+B)$ представить в виде фракции от полной обменной емкости в момент точки проскока, ясно, что эта фракция значительно больше для B', чем для B. Это очевидно также для обработанной жидкости и по виду «кривой насыщения» (рис. 3.32).

Форма кривой насыщения зависит не только от положения кривой статического равновесия, описанного выше, но также и от «кинетики обмена» между жидкостью и ионообменным материалом; эта кинетика включает проникание раствора в смолу

в соответствии с законом равновесия Доннана. Рассматриваемые явления очень сложны; они зависят от степени диссоциации и концентрации ионов, температуры, характера поверхности на границе раздела фаз и кинетики проникания раствора в вещество ионообменного материала.

Величина полной обменной емкости, т. е. общего числа эквивалентов, которое может воспринять 1 л ионообменного материала, имеет только относительную практическую ценность. Для промышленного применения используется величина «полезной емкости», определяемой из изохронных графиков или кривых насыщения, описанных выше и являющихся очень важными.

Для применения в промышленности наиболее важное значение имеют прямые эксперименты с целью получения подобных графиков.

В соответствии с кривыми насыщения для системы ионообменный материал — жидкость качество обработанной жидкости определяется ее качеством в последнем слое, через который прошла жидкость, независимо от ее качества в предыдущих слоях.

Если рассмотреть обратимую реакцию типа $RA+B \rightleftarrows RB+A$, представляющую собой «обработку», и читать ее слева направо, а «регенерацию» — справа налево, то необходимо знать состояние ионообменника в начале цикла обработки, за которым следует цикл регенерации.

Очевидно, что в начале цикла обработки качество обработанной воды, характеризующееся проскоком иона, будет зависеть главным образом от степени регенерации последнего слоя ионообменного материала.

Эти замечания следует всегда учитывать при рассмотрении различных свойств ионообменных материалов и решении вопроса об их промышленном применении.

При удалении сильных кислот с использованием сильноосновного ионообменного материала идут необратимые реакции:

$$HCl + ROH \rightleftarrows RCl + H_2O.$$

Обратная реакция (гидролиз) практически неосуществима. Обмен проходит до конца и может быть осуществлен как в статических, так и в динамических условиях. В этом случае проскок ионов сведен к нулю; при этом предполагается, что длительность контакта воды со смолой достаточна.

Реакции равновесия с выходом нерастворимого соединения сходны с этим типом обмена. Например, если морская вода обрабатывается материалом, насыщенным ионами серебра, то протекает следующая реакция: $RAg+NaCl \rightarrow RNa+AgCl$. Так как AgCl нерастворим, он осаждается. В этих условиях и в соответствии с законом Бертолле, равновесие сдвинуто полностью, реакция проходит до конца даже в статических условиях.

Ионный обмен — реакция не мгновенная, скорость реакции зависит от типа смолы. Практически этот тип обмена позволяет получить кривые насыщения, сходные с показанными на рис. 3.32.

Описанные выше два типа реакций могут быть использованы для удаления одного или более нежелательных ионов из обрабатываемой воды, а также для выделения и концентрирования в ионообменном материале одного или более ионов, которые затем будут получены в чистом и концентрированном виде в регенерационной или промывочной жидкости.

Предварительно фиксированный комплексный анион обеспечивает проведение вторичной реакции, например окислительно-восстановительной с ионами воды или обрабатываемой жидкости без растворения его в жидкости (пример: абсорбция растворенного кислорода при окислении сульфит-анионной смолы $R-NH_3-HSO_3$ в сульфатную форму $R-NH_3-HSO_4$). *Примечание.* Законы, описывающие ионный обмен, не относятся к ионообменникам, которые используются в других целях (катализ, адсорбция).

Методы регенерации.

В процессе умягчения и деионизации воды конец цикла наступает в момент, когда кривые насыщения соответствуют показанным на рис. 3.31 (состояние A' и B'). Можно предположить, по крайней мере, по отношению к нижнему слою, что ионообменный материал насыщен ионом B' и находится в равновесии с концентрацией B' в поступающем потоке. Регенерация достигается путем пропускания потока концентрированного раствора иона A' через ионообменный материал либо в том же направлении, в каком идет насыщение (прямоточная регенерация), либо в противоположном (противоточная регенерация).

При прямоточной регенерации концентрированный раствор иона A' вначале приводится в контакт с теми слоями ионообменного материала, которые насыщены ионами B', удаляемыми из смолы. Ионы B' проникают в нижние менее насыщенные слои ионообменного материала, в которых еще возможна их фиксация.

В конце первой стадии регенерации ионы A' вымываются из ионообменной колонны. Поэтому для полной регенерации ионообменного материала необходимо провести процесс дважды с количеством ионов, соответствующих отношению A'/B'.

Наконец, если количество регенерационного раствора ограничено, ионы B' не будут удалены полностью из ионообменного материала и нижние слои не будут регенерированы полностью.

В течение следующего цикла ионы B' будут подвергаться автоматической регенерации ионами A' из верхних слоев.

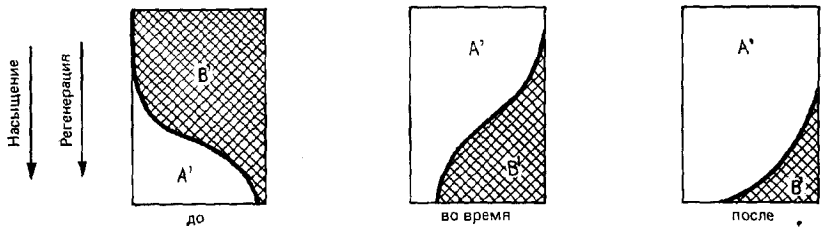


Рис. 3.33. Прямоточная регенерация

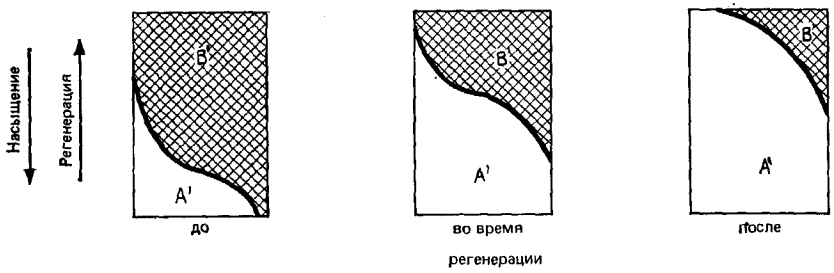


Рис. 3.34. Противоточная регенерация

При противоточной регенерации процесс протекает иначе. Регенерационный агент подается потоком со дна вверх. В этом случае концентрированный раствор ионов A' вначале встречается со слоями смолы с низкой концентрацией ионов B', поэтому вымывание последних проходит в благоприятных условиях. Более того, ионы B' не могут фиксироваться в насыщенных верхних слоях. Таким образом, противоточная регенерация проходит в более обратимых условиях, чем прямоточная, и с термодинамической точки зрения она более эффективна.

Принципу противоточной регенерации присущи два важных преимущества: во-первых, повышение эффективности и соответственно снижение потребности в реагентах при равном качестве, а, во-вторых, улучшение качества обработанной воды благодаря тому, что нижние слои регенерируются при большом избытке реагентов.

3.1.3. РАЗДЕЛЕНИЕ ЖИДКОСТЕЙ

Теория седиментации может быть применена к сепарации капель жидкости, которая не смешивается с водой и находится в ней в свободном состоянии. Если плотность жидкости меньше, чем у воды (например, масло), то капли этой жидкости собираются на поверхности. У водно-масляной смеси число Рейнольдса меньше 0,5 и восходящая скорость капель масла может быть рассчитана по закону Стокса.

В американском нефтяном институте были проведены специальные расчеты для гравитационного сепаратора, предназначенного для удаления всех капель с размерами, превышающими 0,015 см. Если применить полочный сепаратор, то можно выделить частицы с размером до 0,005 см.

Эмульсия масло-вода образует стабильную систему, которая может быть разрушена термическим способом, ультрафильтрацией, коалесценцией, подкислением и т. п.

3.1.4. ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Добавление к водным растворам соответствующих химических веществ может изменить солевой состав воды. Этот способ применяется, например, для полного или частичного снижения щелочности, коррекции pH, а также для изменения степени окисления некоторых веществ в растворе. Рассмотрим основные методы.

3.1.4.1. Осаждение. Методы химической очистки, основанные на применении закона Бертолле, базируются на следующем принципе: добавление к воде раствора реагента, который путем замещения нежелательных ионов, содержащихся в сырой воде, или соединения с ними, приводит к осаждению продукта реакции в соответствии с пределом его растворимости. Этот принцип лежит в основе следующих процессов обработки воды.

Удаление карбонатов с использованием извести. Реакция между OH^--ионами извести и HCO_3^--ионами бикарбонатов приводит к почти полному осаждению карбоната кальция, образующегося в результате реакций:

$$HCO_3^- + OH^- \rightarrow CO_3^{2-} + H_2O;$$

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3,$$

что может быть представлено в обобщенном виде:

$$Ca(HCO_3)_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow 2CaCO_3 + 2H_2O.$$

Умягчение воды, содержащей сульфат кальция, путем добавления карбоната натрия, в соответствии с реакцией:

$$CaSO_4 + Na_2CO_3 \rightarrow Na_2SO_4 + CaCO_3.$$

Удаление сульфатов путем добавления бариевых солей:

$$CaSO_4 + BaCl_2 \rightarrow CaCl_2 + \underset{\downarrow}{BaSO_4}.$$

$$Na_2SO_4 + BaCl_2 \rightarrow 2NaCl + \underset{\downarrow}{BaSO_4}.$$

Удаление фторидов солями кальция:

$$2F^- + Ca^{2+} \rightarrow \underset{\downarrow}{CaF_2}.$$

Удаление фосфатов в виде фосфата железа или алюминия, например:

$$PO_4^{3-} + Fe^{3+} \rightarrow \underset{\downarrow}{Fe\ PO_4}.$$

Удаление кремния, содержащегося в природной воде, возможно путем комплексного осаждения с алюминатом железа или гидроксидом магния, хотя, по-видимому, здесь происходит скорее адсорбция кремния, чем истинная химическая реакция.

Для каждой из таких реакций существенно знать:

а) кинетику реакции. Часто реакция происходит при достаточной концентрации и длительности при условии наличия продуктов ранее прошедшей реакции;

б) предел растворимости образующегося продукта при данных температуре и концентрации различных присутствующих ионов;

в) возможную скорость оседания получаемого осадка (в присутствии флокулянтов и без них).

3.1.4.2. Нейтрализация необходима при любой обработке с целью регулирования значения pH воды до примерно нейтрального или равновесного значения (см. с. 32, равновесие $CaCO_3 - CO_2$). Исходная вода может быть либо кислой, либо щелочной.

Кислая вода. Обычно проблема сводится к нейтрализации углекислоты щелочью или щелочным карбонатом. Это относится к воде, проходящей через гранитные породы, в которых содержание диоксида углерода находится в избытке по сравнению с уровнем природной бикарбонатной щелочности (гидрокарбонатов), а также к воде, получаемой после осветления, если были использованы коагулянты (см. с. 65: коагуляция и флокуляция). В таких водах нейтрализация идет за счет следующих реакций:

$$2CO_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow Ca(HCO_3)_2,$$
$$CO_2 + NaOH \rightarrow NaHCO_3,$$
$$CO_2 + Na_2CO_3 + H_2O \rightarrow 2NaHCO_3,$$
$$CO_2 + CaCO_3 + H_2O \rightarrow Ca(HCO_3)_2.$$

Если вода сильно кислая (например, при регулировании pH в процессе флокуляции, нейтрализации стока, получаемого при регенерации ионообменного материала, или в осадках, образующихся в травильных процессах и т. д.), то реакции нейтрализации могут быть следующего типа:

при регенерации ионообменного материала соляной кислотой и при травлении соляной кислотой

$$HCl + NaOH \rightarrow NaCl + H_2O;$$
$$2HCl + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCl_2 + 2H_2O;$$

при регенерации ионообменного материала серной кислотой и травлении серной кислотой и т. д.

$$H_2SO_4 + 2NaOH \rightarrow Na_2SO_4 + 2H_2O;$$
$$H_2SO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaSO_4 + 2H_2O.$$

Щелочная вода вследствие своего происхождения имеет дефицит диоксида углерода. К этой категории могут быть отнесены стоки, образующиеся при регенерации смол.

В зависимости от дальнейшего использования воды применяют либо CO_2 (главным образом для повышения уровня карбонатов в системах водоснабжения)

$$Ca(OH)_2 + 2CO_2 \rightarrow Ca(HCO_3)_2,$$

либо сильную кислоту

$$Ca(OH)_2 + H_2SO_4 \rightarrow CaSO_4 + 2H_2O;$$
$$2NaOH + H_2SO_4 \rightarrow Na_2SO_4 + 2H_2O.$$

Такая обработка осуществляется главным образом в системах очистки промышленных стоков и реже для целей водоснабжения.

3.1.4.3. Окисление и восстановление. Эти реакции используются для изменения состояния некоторых металлов или соединений (содержащих азот, серу, цианиды и т. д.) с целью перевода их в нерастворимое или нетоксичное состояние.

Некоторые вещества могут существовать в окисленной и восстановленной формах и способны переходить из одной формы в другую, получая электроны (восстановление) или теряя их (окисление). Система, содержащая реципиент и донор электронов, между которыми электроны могут переходить таким образом, что одно вещество окисляется, в то время как другое восстанавливается, называется окислительно-восстановительной системой:

$$\text{Восст.} \rightleftarrows \text{Окисл.}^{n+} + ne^-$$

За исключением кислорода и водорода, которые в состоянии действовать только как окислительный и только как восстановительный агенты соответственно, все вещества в зависимости от условий могут быть либо окислителями, либо восстановителями. Возможность взаимодействия определяется электроизмерением, как описано на с. 910. Она характеризуется окислительно-восстановительным или редокс-потенциалом *, который зависит от активности окисленной и восстановленной форм в соответствии с формулой:

$$E = E_0 + \frac{K}{n} \lg \frac{\text{окисленная форма}}{\text{восстановленная форма}},$$

где n — число электронов, включенных в окислительно-восстановительную реакцию; E_0 — «нормальный» потенциал, определяющий равенство |окисленная форма| = |восстановленная форма|.

* Окислительно-восстановительный, или редокс-потенциал нельзя смешивать с rH (см. с. 580).

Различные вещества могут быть классифицированы и могут сравниваться по значению E_0 потенциала.

Вещество A, имеющее более высокий нормальный потенциал, чем вещество B, будет окислять это последнее. Вещество B будет восстанавливать вещество A.

Ниже приведены значения нормальных потенциалов E_0 при 25° С ряда веществ или отдельных групп элементов, встречающихся в обработке воды (нулевой потенциал имеет водородный электрод):

	E_0
Озон $O_3 + 2H^+ + 2e^- \rightleftarrows O_2 + H_2O$	$+2{,}07V$;
Хлор $Cl_2 + 2e^- \rightleftarrows 2Cl^-$	$+1{,}39$
Хром VI $Cr_2O_7^{2-} + 14H^+ + 6e^- \rightleftarrows 2Cr^{3+} + 7H_2O$	$+1{,}33$;
Марганец $MnO_2 + 4H^+ + 2e^- \rightleftarrows Mn^{2+} + 2H_2O$	$+1{,}23$;
Азот иона аммония $NH_4^+ + 2H_2O \rightleftarrows NO_2^- + 8H^+ + 6e^-$	$+0{,}897$;
Азот нитритов $NO_2^- + H_2O \rightleftarrows NO_3^- + 2H^+ + 2e^-$	$+0{,}835$;
Железо $Fe^{3+} + e^- \rightleftarrows Fe^{2+}$	$+0{,}77$;
Сульфат $SO_4^{2-} + 4H^+ + 2e^- \rightleftarrows H_2SO_3 + H_2O$	$+0{,}17$.

Обычно превращение вещества из одной формы в другую эффективно при участии вещества, которое само тоже может существовать в обоих формах в соответствии с уравнением:

$$a\ \text{окисл}_1 + b\ \text{восст}_2 \rightleftarrows a\ \text{восст}_1 + b\ \text{окисл}_2.$$

Таким образом, мы видим комбинацию двух окислительно-восстановительных систем.

Смешивая эквивалентные количества окислительного агента с восстановительным ($a|\text{окисл}_1| = b|\text{восст}_2|$), можно достичь точки эквивалентности. Потенциал E системы может быть выражен:

$$E = (bE_1 + aE_2)/(a + b).$$

На кривой титрования (потенциал — функция концентрации окислительного агента) это состояние характеризуется точкой перегиба.

Наиболее широкое применение окислительно-восстановительные реакции имеют при удалении железа и марганца в бытовом и промышленном водоснабжении, а также при детоксикации стоков очистных станций, если в воде содержатся цианиды или хроматы (см. гл. 25).

Как показано ниже (см. с. 110), ряд окислительно-восстановительных реакций происходит под действием бактерий.

3.2. БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Биологические процессы находят чрезвычайно широкое распространение. Рассмотрим их применительно к очистке сточных вод, содержащих органические вещества. Очистка такого рода включает ферментацию, т. е. химические реакции, осуществляемые определенными микроорганизмами, в том числе бактериями, играющими здесь жизненно важную роль. Бактерии воздействуют на примеси, которые служат для них питательной средой или субстратом. Все химические реакции катализируются энзимами, синтезируемыми бактериями и действующими как агенты, поддерживающие реакцию. Процесс очистки основан на принципе развития бактериальной культуры, обеспечивающей эффект очистки.

3.2.1. РОСТ БАКТЕРИАЛЬНОЙ КУЛЬТУРЫ

Кривая роста бактериальной культуры включает следующие фазы, отличающиеся разной скоростью развития (рис. 3.35):

1) латентную, во время которой микроорганизмы акклиматизируются в питательной среде путем модификации ферментативной системы (эта фаза очень важна, особенно если сточная вода, например промышленный сток, не содержит бактерий);

2) фазу роста с постоянной скоростью, называемую обычно экспоненциальной;

3) фазу, в которой скорость роста медленно снижается;

4) фазу стационарного роста;

5) фазу отмирания.

Моно был одним из первых, выразивших рост одноклеточных организмов в математической форме:

$$\frac{dS}{dt} = f(L, S),$$

где S — масса клеток в расчете на единицу объема; L — концентрация субстрата (питания).

Экспоненциальная фаза. Если питание присутствует в достаточной концентрации и ничто не ингибирует рост культуры, он происходит с постоянной скоростью и написанное выше уравнение принимает вид:

$$dS/dt = \mu S.$$

Скорость роста μ легко определить, связав ее с временем деления клеток t_d, которое соответствует времени удвоения биомассы:

$$\mu = \frac{1}{S}\frac{dS}{dt} = \frac{d \ln S}{dt} = \frac{0{,}693}{t_d}$$

$$(0{,}693 = \ln 2).$$

Предположим, что постоянная часть питательного веще-

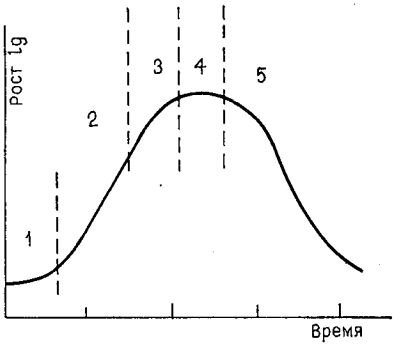


Рис. 3.35. Кривая роста бактериальной культуры

ства превращается в живые клетки за время Δt. Тогда количество микроорганизмов увеличится на

$$\Delta S = a_m L_e,$$

где a_m выражается в мг клеток, продуцируемых в расчете на 1 мг удаленного субстрата (L_e) за рассматриваемый период времени

$$\ln \frac{S}{S_0} = \ln \frac{S_0 + \Delta S}{S_0} = \ln \frac{S_0 + a_m L_e}{S_0} = \ln \left(1 + \frac{a_m L_e}{S_0}\right) = \mu t,$$

где S_0 — концентрация клеток при времени $t=0$.

Связь между $\ln \left(\frac{1 + a_m L_e}{S_0}\right)$ и временем t

выражается прямой линией, градиент которой определяет μ, экспоненциальную скорость роста.

Фаза замедленного роста и прекращение роста. Когда условия становятся неблагоприятными, скорость роста снижается. Причинами для замедления или прекращения роста являются снижение концентрации питания, накопление токсичных продуктов обмена или изменение условий окружающей среды.

Если рост ограничен из-за недостатка питания, основное уравнение трансформируется в

$$dS/dt = k_1 LS.$$

При

$$k_2 = k_1/a_m$$

вычисления приводят к уравнению:

$$L_f/L_0 = 1/(1 + k_2 St),$$

где L_f — концентрация питания при времени t; L_0 — начальная концентрация.

Фаза отмирания. В течение этого периода микроорганизмы не имеют питания и некоторые из них отмирают. Скорость отмирания пропорциональна концентрации микроорганизмов S:

$$dS/dt = -bS.$$

где b — скорость отмирания.

Различные фазы и уравнения для них применимы как к аэробной, так и к анаэробной среде. Только коэффициенты μ, k_2, a_m и b зависят от типа микроорганизмов, характера питательных веществ и температуры.

3.2.2. ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ЗАГРЯЗНЕННОСТИ ВОДЫ ОРГАНИЧЕСКИМИ ВЕЩЕСТВАМИ

Учитывая разнообразие органических веществ, содержащихся в стоках, утомительно и совершенно бессмысленно рассматривать природу каждого из этих веществ при описании биологических процессов очистки. Количество органических и летучих веществ, содержащихся в осадках, определяют в целом после прокаливания в печи при 600 °С.

Известно, например, что полное окисление глюкозы, содержащейся в сточной воде, выражается уравнением: $C_6H_{12}O_6 + 6O_2 = 6CO_2 + 6H_2O$. Это значит, что если добавить $6 \times 32 = 192$ г/моль кислорода к 180 г/моль (молярная масса) глюкозы, то образуется 264 г/моль CO_2 и 108 г/моль воды. Результаты подсчетов по этой реакции дают возможность определить количество кислорода, потребное для окисления, и количество образующегося диоксида углерода. По количеству кислорода можно подсчитать потребное количество химического окислителя или растворенного кислорода, действующего в присутствии энзимов — катаболических агентов, продуцируемых микроорганизмами.

Химическое окисление. В зависимости от типа окислителя и температуры, при которой проводится реакция, получаются различные результаты. Здесь следует сказать об использовании перманганата калия на холоду (4 ч) или при нагревании (10 мин при температуре кипения) в исследовании источников водоснабжения для определения их пригодности с целью получения питьевой воды; это измерение дает возможность судить о способности к окислению.

Стандартный метод для сточных вод предполагает применение бихромата калия в сернокислой среде; это сильный окислитель и определяет химическую потребность в кислороде (ХПК). Точность измерения составляет около 5%. Определение занимает 2 ч.

ХПК описывает все соединения, способные к окислению, в частности, окисляемые минеральные соли (сульфиды, соли металлов с низшей валентностью) и большинство органических веществ, способных или неспособных к окислению биологическим способом. Минеральные бикарбонаты устойчивы по отношению к этому сильному окислителю, но иногда их присутствие может приводить к ошибочным результатам.

Биохимическое окисление. Биохимическая потребность в кислороде (БПК) — это количество кислорода, выраженное в мг/л, потребляемое в условиях теста (инкубация при 20 °С, без доступа света) за данный период времени при окислении биологическим путем биоразлагаемого органического вещества, содержащегося в сточных водах. Полное биологическое окисление происходит в течение от 21 до 28 сут. За такой период получают значения $БПК_{полн}$ ($БПК_{21}$ или $БПК_{28}$). Кривые, описывающие потребление кислорода в зависимости от времени, имеют вид, показанный на рис. 3.36.

Кривая *1* получается при исследовании воды, содержащей как углеродные, так и азотные вещества. Первыми окисляются углеродсодержащие соединения, а затем азотсодержащие, что обусловливает подъем кривой вследствие явления нитрифика-

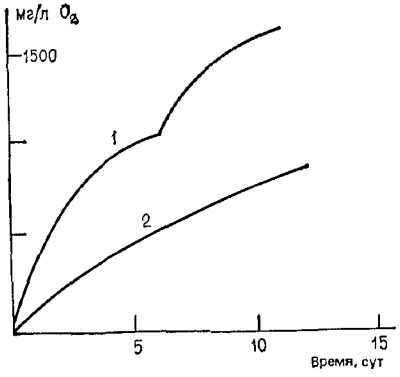


Рис. 3.36

ции (см. с. 111). Кривая *2* характерна для окисления только углеродсодержащих соединений в отсутствии нитрификации.

Значение $БПК_{21}$, требующее слишком большого времени для измерения, удобно заменить $БПК_5$, количеством кислорода, потребляемым за 5 сут инкубации (см. с. 954) или $БПК_7$. Значение $БПК_5$ обычно обусловлено присутствием только биоразлагаемых углеродсодержащих органических загрязнений.

Соотношение между $БПК_5$, $БПК_{21}$ и ХПК. Если все органические вещества в воде биоразлагаемы, то $ХПК \simeq БПК_{21}$.

Для глюкозы мы имеем:

$$БПК_{21}/БПК_5 \simeq ХПК/БПК_5 = 1{,}46.$$

Если же присутствуют вещества, биохимически неразлагаемые, то для бытовых сточных вод (а также и многих производственных сточных вод) $ХПК > БПК_{21}$. Типичными примерами биоразлагаемых веществ являются целлюлоза, угольная пыль, лигнин, тонин, опилки и т. д.

На практике соотношение $ХПК : БПК_5$ изменяется в широких пределах и не может быть предсказано для каждой воды.

Измерение органического углерода. Взамен определения количества потребляемого кислорода можно определить количество диоксида углерода, образующегося при сжигании микрообразца (для этой цели в продаже имеется несколько очень дорогих приборов). Таким способом измеряется количество общего органического углерода раствора (ООУ). При использовании приборов требуется, чтобы взвешенные вещества были удалены из микропробы до измерения. Поэтому в большинстве случаев результат описывает только часть общего количества загрязнений.

3.2.3. АЭРОБНАЯ ОБРАБОТКА

В аэробных условиях биоразлагаемые вещества L_e потребляются массой микроорганизмов S_a. При этом микроорганизмы поглощают кислород для удовлетворения своих энергетических потребностей на воспроизводство путем клеточного деления (синтез живой материи) и эндогенное дыхание (прогрессирующее самоокисление клеточной биомассы). Образуется избыток живой и инертной материи, называемый избыточным илом.

Очень трудно экспериментально определить массу активного вещества S_a. Однако массу беззольного (или органического) вещества S_v и общую (минеральную и органическую) S_t измерить можно.

Теоретическая потребность в кислороде может быть вычислена из уравнения

$$O_2 \text{ потребленный} = a'L_e + b'S_v.$$

Коэффициенты a' и b' можно определить лабораторным путем (на аппарате типа Варбурга).

В результате биомасса избыточного ила составит:

$$\Delta S_v = a_m L_e - bS_v,$$

где L_e — масса загрязнений по $БПК_5$, снятых за сутки, кг/сут; S_v — масса органического вещества в ферменторе (или биологическом реакторе); кг; ΔS_v — выражается в кг/сут.

$$\frac{\Delta S_v}{S_v} = a_m \frac{L_e}{S_v} - b.$$

Это уравнение вида $y = ax - b$, из которого может быть определено значение b.

Примечание. Количество взвешенных веществ (инертная органика и минеральная часть), присутствующих в воде, поступающей в реактор, должно быть прибавлено к массе избыточного ила, образующегося в результате бактериальной активности при разложении биоразлагаемого органического вещества.

Сведения, относящиеся к биологическому реактору. Нагрузка на ил C_m — это соотношение между массой питания (по $БПК_5$ или по массе органического вещества), поступающего в реактор за сутки, и массой ила S_t, находящегося в реакторе: $C_m = L_0/S_t$.

Более точные результаты дают расчеты по беззольному веществу, а не по общему количеству ила S_t. В этом случае нагрузка на ил будет C'_m. Фактически, если ил содержит β% беззольного вещества:

$$S_v = \beta S_t$$

и

$$C'_m = L_0/S_v = L_0/\beta S_t = C_m/\beta.$$

На практике обычно при определении нагрузки применяют C_m.

Объемная нагрузка C_v или нагрузка по БПК — это масса питательных веществ (по $БПК_5$ или по массе беззольного вещества), поступающих за сутки в реактор объемом V:

$$C_v = L_0/V, \text{ кг/ (м}^3 \cdot \text{сут)}.$$

Для аэробных условий, если ρ — эффективность очистки по $БПК_5$, потребление кислорода и образование органического вещества ила на 1 кг снятой БПК определяют по уравнениям:

$$L_e = \rho L_0;$$

$$\frac{O_2 \text{ потребленный}}{L_e} = a' - \frac{b'}{\rho C_m};$$

$$\frac{\Delta S_v}{L_e} = a_m - \frac{b}{\rho C_m}.$$

В расчете на 1 кг снятой БПК при низкой нагрузке имеют место низкий прирост ила и высокое потребление кислорода.

Теоретическая (или номинальная) потребность в кислороде, отнесенная к 1 кг БПК, изменяется в зависимости от фактора нагрузки.

Некоторые авторы используют понятие возраста ила, т. е. соотношения между массой находящегося в реакторе ила и суточным приростом ила:

$$A = S_t/\Delta S_t \text{ или } S_v/\Delta S_v.$$

Возраст ила обратно пропорционален нагрузке на ил:

$$A = 1/(a_m \rho C_m' - b).$$

Примечание. В анаэробных условиях это соотношение называется критическим временем пребывания сухого вещества ($SRT = S_v/\Delta S_v$), которое не соответствует гидравлическому времени пребывания.

A и SRT показывают число суток, необходимое для полной смены ила.

Потребность в биогенных элементах. Как показано выше, микроорганизмы нуждаются в пропорциональном питании. Для характеристики общего состава синтезируемых клеток приводят формулу: $C_{106}H_{180}O_{45}N_{16}P$.

Как видно из формулы, азот и фосфор — необходимые элементы питания. Бытовые сточные воды содержат все эти элементы, а в промышленных стоках часто не хватает и N и P. Чтобы обеспечить биологическую очистку таких стоков, необходимо добавлять к ним азот и фосфор в виде ассимилируемых минеральных солей или специального питания.

Температура оказывает влияние на все биологические процессы. С повышением ее возрастает скорость ферментативных реакций. Однако в аэробиозе температура имеет противоположное влияние на растворимость кислорода в воде. Окончательный результат определяется уравнением:

$$k_2/k_2' = \theta^{t'-t},$$

где k_2 и k_2' — значения константы k_2 соответственно при температурах t и t' (см. с. 102) и θ изменяется в зависимости от вида биологической системы и подаваемой нагрузки в пределах от 1 до 1,09.

Токсичность. Септичность. Многие вещества обладают токсичным действием на активность микроорганизмов. Очистка может быть полностью или частично ингибирована в зависимости от природы или концентрации этих веществ. Бактериостатические концентрации ингибируют развитие бактерий временно, а бактерицидные концентрации приводят к гибели бактерий. Если токсичные вещества вводятся непрерывно в допустимых дозах, то бактериальная флора становится устойчивой к этим веществам. Случайное поступление тяжелых металлов (Cu^{2+}, Cr^{6+}, Cd^{2+}) даже в небольших количествах (0,1 мг/л) может нарушить деятельность бактерий. Степень свежести сточной воды может быть определена по ее окислительно-восстановительному потенциалу (рис. 3.37).

Сточная вода в канализационной сети становится доступной для гнилостной ферментации; септические условия в сети создаются вследствие либо попадания в нее стока из септиктенка, либо слишком длительного нахождения в сети, в результате чего в ней образуется осадок, способный к гнилостной ферментации (см. с. 1014).

Аэрация. При введении кислорода в воду на поверхности раздела двух фаз образуется мономолекулярный двойной слой, насыщенный кислородом. Одновременно начинается диффузия газа в глубокие слои воды. Скорость ее подчиняется закону Фика:

$$\frac{dm}{dt} = AK_L \frac{dC}{dt}.$$

Количество вещества dm, которое диффундирует в единицу времени dt через площадь поверхности A, определяется константой диффузии K_L и концентрационным градиентом dC/dt. Если концентрации выражены в мг/л, а скорость в мг/(л·ч), то K_L будет иметь размерность $ч^{-1} \cdot K_L A$ — это так называемый коэффициент переноса.

Согласно этому уравнению окислительная способность аэрационной системы определяется как количество кислорода, выраженное в г/м³, получаемое чистой водой за 1 ч при отсутствии в ней кислорода, температуре 10 °С и атмосферном давлении 0,1 МПа.

Окислительную способность подсчитывают по уравнению

$$\frac{dC}{dt} = 11{,}25 \frac{1}{t_1 - t_0} \lg \frac{C_s - C_0}{C_s - C_t} \sqrt{\frac{k_{10}}{k_t}}.$$

где dC/dt — окислительная способность, г/(м³·ч); C_s — содержание O_2 при полном насыщении, г/м³; C_0 — содержание O_2 в начале эксперимента, г/м³; C_t — содержание O_2 спустя время t, г/м³; 11,25 — концентрация насыщения O_2 при 10 °С, г/м³; $t_1 - t_0$ — период наблюдения, ч; k_{10} и k_t — коэффициенты диффузии при 10° С и t° С.

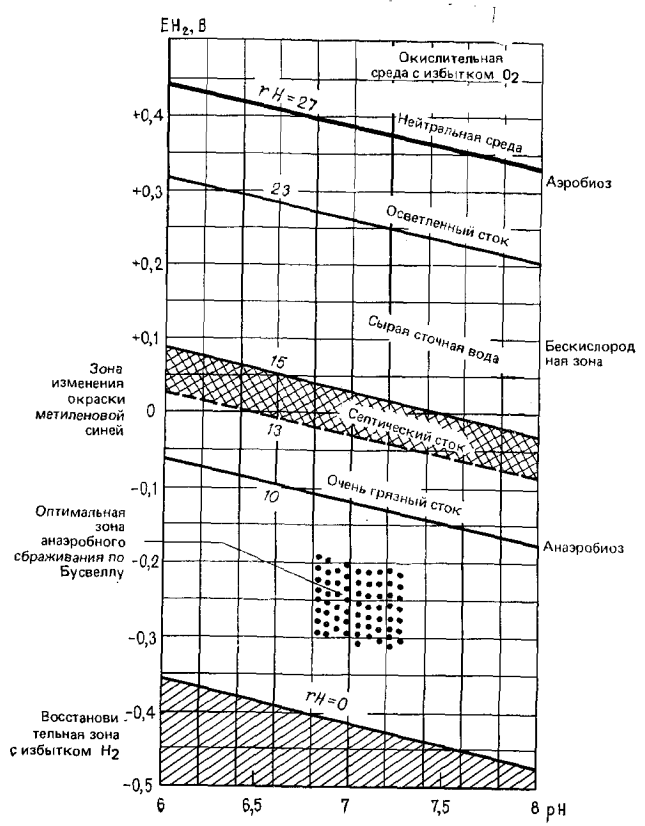


Рис. 3.37. Диаграмма «потенциал — pH» для загрязненной воды

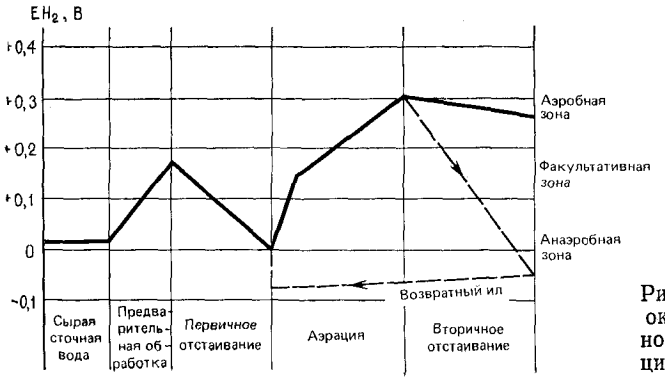


Рис. 3.38. Изменение окислительно-восстановительного потенциала на очистной станции (Гиперион)

Примем $C_s - C_0 = D_0$ и $C_s - C_t = D_t$, D_0 и D_t — дефицит кислорода в начале эксперимента и при времени t, тогда окислительная способность будет:

$$11{,}25 \times 2{,}3 \frac{1}{t_1 - t_0} \lg \frac{D_0}{D_t} \sqrt{\frac{k_{10}}{k_t}}.$$

Соотношение между D_0 и D_t в зависимости от времени, представленное графически в логарифмических координатах, дает прямую линию, тангенс угла наклона которой α определяет скорость растворения кислорода:

$$25{,}9 \operatorname{tg} \alpha \sqrt{k_{10}/k}.$$

Количество вводимого кислорода зависит от следующих факторов: площади поверхности раздела фаз воздуха и воды и степени ее обновления, градиента концентраций кислорода в воде и воздухе, длительности диффузии кислорода. Существуют, однако, физические и технические ограничения для оптимальных значений указанных параметров.

Важную роль играет размер пузырька воздуха. Есть, однако, нижний предел его размера, ибо пузырек воздуха, выходящий из отверстия под водой, имеет диаметр много больше диаметра пор: практически диаметр пузырьков, образующихся в системах аэрации с пористыми аэраторами, не более 1 мм. Мелкие пузырьки могут образовываться только в случае, если воздух подается в воду под давлением (как при флотации).

При прочих равных условиях коэффициент переноса кислорода зависит от природы воды (чистая, сточная, содержащая взвесь или растворенные вещества, в особенности, поверхностно-активные агенты), системы аэрации и геометрии реактора. Обычно системы аэрации сравнивают по их окислительной способности в расчете на 1 м^3 в час. Удельная окислительная способность системы может быть также выражена в единицах количества подаваемого кислорода в расчете на кВт·ч.

3.2.4. АНАЭРОБНАЯ ОБРАБОТКА: СБРАЖИВАНИЕ

Анаэробное сбраживание — это ферментация в отсутствии кислорода, процесс стабилизации органического вещества вследствие превращения его из сложных соединений в метан и диоксид углерода. Первое бактериальное сообщество, состоящее из кислотообразующих бактерий, обусловливает превращение сложных органических соединений в более простые органические вещества (уксусную, пропионовую и масляную кислоты), которые служат источником питания второго сообщества метанообразующих бактерий, которые являются ключевыми орга-

низмами анаэробного сбраживания. Они — строгие анаэробы; развиваются медленно и очень чувствительны к температуре и изменениям pH окружающей среды.

Редокс-потенциал анаэробной ферментации, подсчитанный по отношению к водороду, колеблется приблизительно от —0,2 до —0,3V.

Обычно органические вещества сбраживаются мезофильными бактериями при температуре 37 °С. С точки зрения кислотно-щелочного равновесия анаэробно сброженная жидкость может быть представлена как водный раствор промежуточных и конечных продуктов, таких как:

летучие кислоты (уксусная, пропионовая) и их соли (в пересчете на CH_3COOH), находящиеся в равновесии с кислотами;

угольная кислота и ее кислые соли: бикарбонаты в пересчете на $CaCO_3$);

аммонийные соединения.

При данном значении pH и концентрации летучих кислот существует определенное соотношение между кислотой и ее солями. И соответственно для заданного общего количества CO_2 имеет место равновесие между свободной кислотой и ее бикарбонатами.

Летучие кислоты несколько более сильные, чем угольная кислота. При pH=5 мы имеем 64,3% ацетата в равновесии с 35,7% уксусной кислоты

при pH,	равном	5,5	85%	ацетата	в	равновесии	с	15%	уксусной	кислоты
»	»	»	6	94,74%	»	»	»	» 5,26%	»	»
»	»	»	6,5	98,26%	»	»	»	» 1,74%	»	»
»	»	»	7	99,45%	»	»	»	» 0,55%	»	»

Общая щелочность, выраженная по $CaCO_3$ в мг/л или мг-экв/л, подразделяется на бикарбонатную и ацетатную.

При pH близком к 7 и хорошем сбраживании все летучие кислоты в первом приближении находятся в форме солей (главным образом аммонийных).

Основными критериями, контролирующими процесс брожения, являются: продуцирование газа и его состав; летучие кислоты; значение pH; общая щелочность; запах бродящего осадка.

3.2.5. БАКТЕРИАЛЬНОЕ ОКИСЛЕНИЕ — ВОССТАНОВЛЕНИЕ

Некоторые окислительно-восстановительные реакции (см. с. 99) могут быть результатом деятельности бактерий при окислении ими железа и марганца в воде (см. с. 653), соединений серы (см. с. 1017), а также окисления и восстановления соединений азота.

Все биологические процессы были описаны в основном применительно к удалению углеродсодержащих органических веществ. Стоки содержат также азотные соединения в виде белков, аминокислот, мочевины и продуктов их распада, таких как неорганический азот главным образом, в виде аммонийных солей. Все эти азотные загрязнения могут подвергаться трансформации в азотных циклах под действием соответствующих бактерий (см. с. 1014).

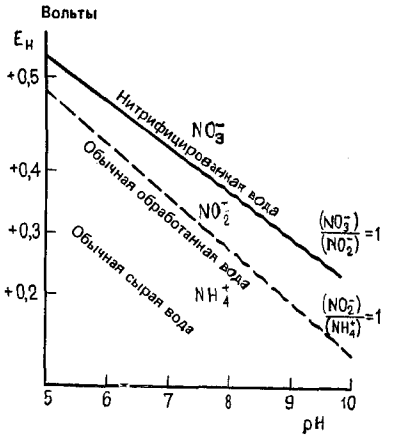


Рис. 3.39. Нитрификация

Нитрификация — это бактериальный процесс, в котором органические и аммонийные соединения (общий азот по Кьельдалю) окисляются в нитриты (бактериями Nitrosomonas), а затем в нитраты (бактериями Nitrobacter). На рис. 3.39 показана зона потенциалов, в которой протекают эти процессы.

При осуществлении бактериями этих реакций нитриты определяются только в виде следов, так как скорость размножения таких бактерий, как Nitrosomonas (1 сут), меньше, чем скорость размножения Nitrobacter в оптимальных условиях окружающей среды.

Для развития нитрификации необходимо, чтобы возраст ила был достаточным для развития бактерий, размножающихся медленно. Если A — возраст ила и μ_N — скорость роста Nitrosomonas, то должно быть удовлетворено следующее условие:

$$1/A < \mu_N.$$

Скорость роста Nitrosomonas зависит от температуры T в соответствии с выражением:

$$\mu_N = 0{,}212 \times 1{,}0725^{T-15}.$$

Она зависит от pH и изменяется по уравнению:

$$\mu_N = \mu - 0{,}17\ (7{,}2 - \text{pH}),$$

где μ — скорость роста при pH=7,2.

Наконец, концентрация остаточного $N_{общ}$, Ne, влияет на скорость окисления K аммонийных соединений в соответствии с уравнением типа:

$$K = \frac{K_m\,\mathrm{Ne}}{K_S + \mathrm{Ne}},$$

где K_m — максимальная скорость окисления; K_S — концентрация аммонийного азота при $\mu = \frac{1}{2}\,\mu_m$.

Денитрификация происходит в том случае, когда концентрация растворенного кислорода в воде слишком мала или практически близка к нулю (бескислородная фаза): факультативные микроорганизмы используют кислород нитратов, восстанавливая его последовательно в форму NO^-_2, газ оксид азота NO, в закись азота N_2O и, наконец, в азот N_2. Эти изменения наблюдаются при значениях pH=7 и редокс-потенциала от +0,35 до +0,40V, т. е. в том же диапазоне, как и нитрификация. Если в некоторых случаях (например, при анаэробном сбраживании) редокс-потенциал имеет отрицательные значения (от —0,2 до —0,3V), то восстановление нитритов и нитратов проходит до образования NH_4^+.

Теоретически денитрификация ингибируется присутствием кислорода. В действительности бактерии, участвующие в этом процессе, принадлежат к факультативным анаэробным гетеротрофам, которые получают высвобождающуюся энергию, когда электроны переносятся с органических соединений на O_2, NO^-_2 или NO^-_3.

Если для бактерий оказываются доступными и кислород и окисленные соединения азота, то акцептором будет то вещество, которое дает наибольший выход энергии на единицу окисленного органического вещества. Маккарти [1] опубликовал следующие данные для кислорода и нитратов:

Источник энергии	Выход энергии, кДж, на один электрон акцептора	
	O_2	NO^-_6
Бытовые сточные воды	110,355	101,968
Метанол	116,088	109,591
Этанол	110,321	103,824

Как видно, количество выделяющейся энергии неизменно больше для процесса с кислородом, чем с нитратами, поэтому предпочтительнее перенос электронов на кислород. Следовательно, наличие кислорода в растворе ингибирует денитрификацию.

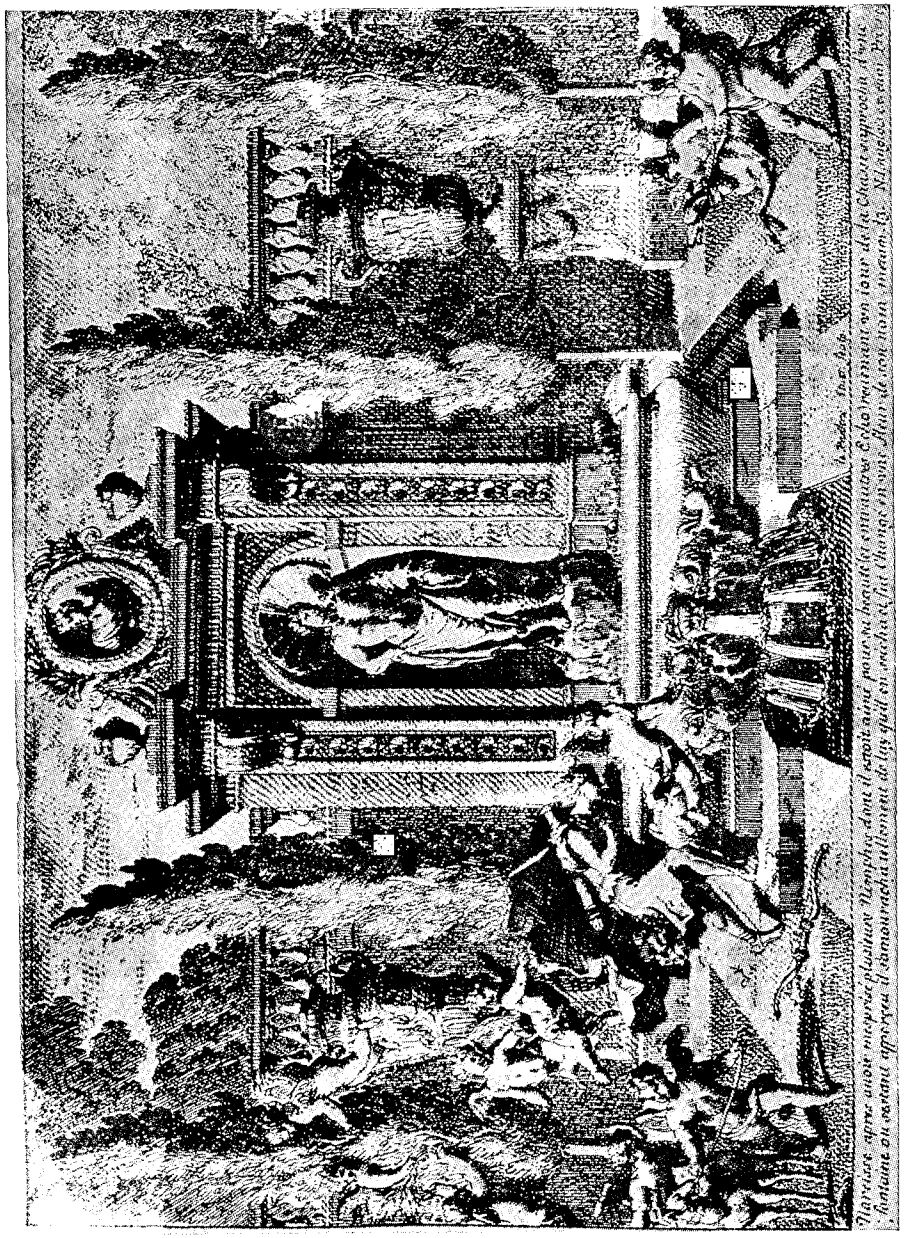
Максимальная энергия выделяется при использовании метанола. По этой причине большинство исследователей выбирают именно метанол в качестве источника углерода для денитрификации. С другой стороны, бытовые стоки обеспечивают почти ту же энергию бесплатно, а потому они весьма привлекательны в качестве источника углерода.

Что касается pH, то оптимальное значение лежит между 7 и 8,2. Следовательно, избыточная нитрификация, приводящая к соответствующему понижению pH воды, если она не обладала достаточной буферностью, будет препятствовать денитрификации. Этим объясняются сложности, встречающиеся при решении проблемы биологического удаления избыточного общего азота и азота аммиака $N—NH_4^+$.

Джонсон показал, что денитрификация развивается пропорционально количеству использованного субстрата. Он также продемонстрировал, что независимо от вида углеродного субстрата на 1 мг восстановленного азота нитратов удаляется от 4 до 6 мг $БПК_5$ (в отсутствии кислорода). Поэтому денитрификация дает возможность удалить большие количества углеродсодержащих загрязнений ($БПК_5$) при использовании кислорода нитратов.

Наконец, следует иметь в виду, что подобно любым ферментативным реакциям, денитрификация чувствительна к температуре и при $t < 10°$ С имеется тенденция к снижению скорости процесса.

[1] Маккарти: «Energetics of organic matter degradation in Water pollution microbiologie», Wiley, 1972.



4. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА

Любые природные и (или) сточные воды перед поступлением на основные очистные сооружения желательно подвергать предварительной обработке физическими или механическими способами, чтобы удалить вещества, присутствие которых нежелательно в дальнейших процессах обработки. Рассмотрим следующие способы предварительной обработки (одновременно могут быть использованы один или несколько этих способов в зависимости от размеров очистной станции и качества сырого стока): процеживание; измельчение отбросов; удаление песка; предварительная обработка; удаление нефти и жиров; тонкое процеживание; удаление и обработка песка и отбросов.

4.1. ПРОЦЕЖИВАНИЕ

Для процеживания используют стержневые решетки, которые позволяют предохранить очистные станции от поступления крупных примесей (они могут оказаться причиной блокирования различных сооружений), а также выделить и экстрагировать более легкие и крупные примеси, находящиеся в исходном стоке, способные создавать препятствия в эксплуатации последующих сооружений.

Эффективность работы решеток зависит от величины прозоров между стержнями. Различают решетки с мелкими прозорами (от 3 до 10 мм), средними (от 10 до 25 мм) и крупными (от 50 до 100 мм). Решетки очищают либо вручную или, когда станция достаточно большая, с применением автоматизированной системы; в этом случае решетку называют механической стержневой решеткой.

С целью предохранения механических стержневых решеток воду предварительно процеживают через стержневые решетки с крупными прозорами (50—100 мм), которые, как правило, очищают вручную, но могут быть также и механическими для очень больших станций или в случае, если исходная вода несет большие количества крупных примесей.

Применение механических стержневых решеток обусловлено не только размерами станции. Необходимость уменьшить число обслуживающего персонала может оправдать выбор такого оборудования даже для малых станций. Механические стержневые решетки обязательно используют и в том случае, когда имеется риск внезапного поступления большого количества раститель-

ности, которая аккумулируется на поверхности стержневой решетки и образует спутанный клубок, полностью перекрывающий поступление воды.

Если очистка осуществляется вручную, то поверхность решетки должна быть запроектирована с запасом, чтобы исключить слишком частую очистку, в особенности, когда прозоры между стержнями менее 20 мм.

Если очистка осуществляется автоматически, резервное оборудование проектируют в зависимости от веса отбросов (см. гл. 7.1, с. 137). В частности, вместимость передвижного приемника должна быть достаточной для сбора отбросов, задерживаемых решетками за период не менее 24 ч.

Если сырой осадок (из первичных отстойников) обрабатывают непосредственно центрифугированием (без сбраживания) после процеживания сквозь тонкие решетки, это исключает необходимость установки оборудования для тонкого процеживания сырой воды; в этом случае могут быть использованы решетки со средними прозорами от 15 до 25 мм.

4.1.1. ТИПЫ СТЕРЖНЕВЫХ РЕШЕТОК

Стержневые решетки с ручной очисткой изготовляют из прямоугольных стальных стержней и устанавливают вертикально, но чаще под углом от 60 до 80° к горизонтали.

На водопроводных станциях малых и средних размеров иногда взамен решеток перед насосами, подающими сырую воду, устанавливают сита. В некоторых ситах, самоочищающихся, используются различного рода приспособления для противоточной промывки (например, промывочный сифон).

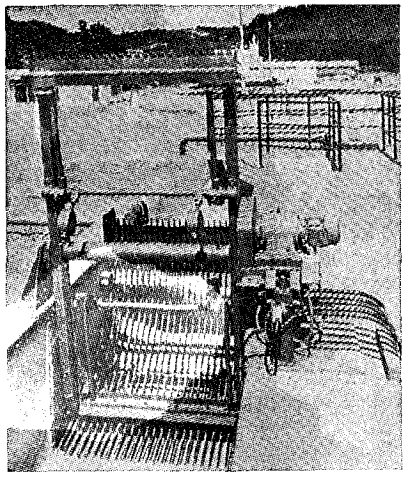


Рис. 4.1. Круглая решетка

На небольших очистных станциях в сельской местности, если трубы, подающие воды, проложены глубоко в грунте, стержневые решетки иногда заменяют перфорированными корзинами, которые для очистки могут быть подняты.

Механические решетки, оборудованные граблинами с наружной стороны, подразделяют на круглые и прямоугольные.

Круглые решетки идеальны для станций средних размеров и средней нагрузки по количеству примесей. Они наи-

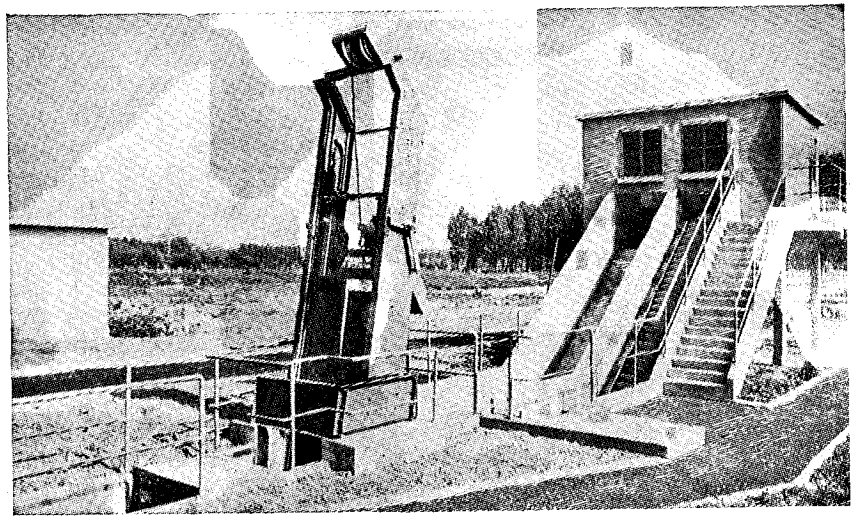


Рис. 4.2. Решетка рамного типа

более подходящи для относительно неглубоких сооружений. Их основное преимущество заключается в том, что они имеют большую полезную площадь поверхности. Очистка осуществляется двумя граблинами, закрепленными на кронштейнах, вращающихся вокруг горизонтальной оси. Снятые с решеток отбросы сбрасываются либо в перемещающийся бункер, либо (что предпочтительнее) на ременной конвейер или же архимедов винт, которые обеспечивают удаление отбросов в горизонтальном направлении и передачу их в приемники большого объема.

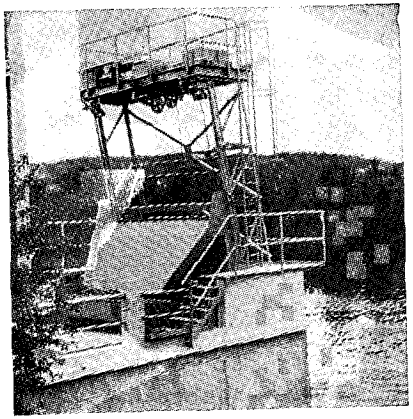


Рис. 4.3. Решетка тросного типа с ковшом

Прямоугольные решетки с возвратно-поступательной очисткой снабжены стержнями прямоугольного или трапецеидального сечения (уменьшается риск забивания решетки твердыми отбросами), обычно с наклоном 80° к горизонту, при этом верхняя часть выше максимального уровня жидкости; решетка имеет металлический или бетонный настил.

Грабельный механизм с возвратно-поступательным движением поднимает отбросы. С помощью специального приспособле-

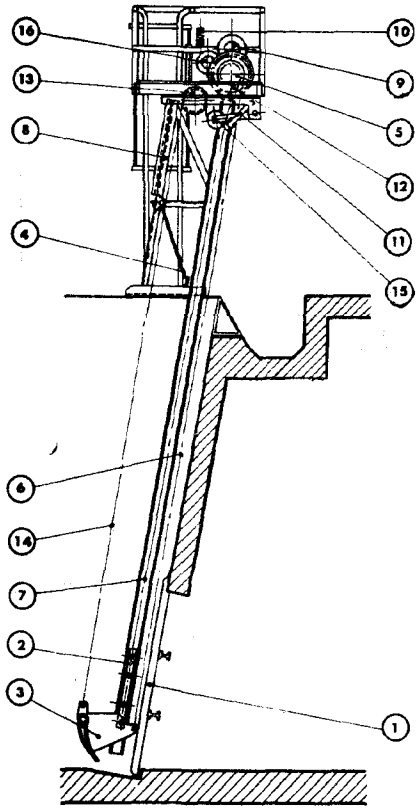


Рис. 4.4. Решетка тросного типа с ковшом

1 — стержневая решетка; *2* — ковшовая рама; *3* — навесной ковш; *4* — устройство для очистки ковша; *5* — барабан для рамного троса; *6* — рамный трос; *7* — направляющий рельс; *8* — каркас; *9* — рамный привод; *10* — ограничитель натяжения; *11* — ненатянутый трос, рама; *12* — барабан для ковшового троса; *13* — обратный шкив, ковш; *14* — трос ковша; *15* — ненатянутый трос, ковш; *16* — ковшовый привод

ния отбросы сбрасываются затем в передвижной приемник или на ременной конвейер, расположенный с внутренней стороны решетки.

Грабельный механизм может состоять из:

граблины, укрепленной на несущем устройстве, перемещающемся вдоль рамы (такое устройство рекомендуется применять в случае, если высота подъема и объем отбросов не очень велики);

граблины, соединенной с несущим устройством, приводимым в движение двумя тросами (эта система используется при незагрязненных стоках и глубоком заложении каналов);

крюка (или вращающегося черпака), управляемого самостоятельным тросом и соединенного с подвижным устройством двумя тросами. Такой механизм пригоден для сильно загрязненных стоков и при очень глубоком заложении каналов.

Прямоугольные решетки с непрерывной очисткой представляют собой относительно тонкие решетки, которые целесообразно использовать только в том случае, когда объемные инородные предметы попадают не часто (или если вода уже прошла через средние решетки). Решетки, расположенные под углом 80° к горизонту, очищаются нейлоновыми щетками, укрепленными на бесконечной цепи. Отбросы удаляются подъемным устройством, расположенным сзади решетки.

Если расход воды очень велик (например, выше 30 000 м³/ч) и вода содержит лишь небольшое количество инородных примесей, очистка может быть эффективной при применении передвижного механизма, который одновременно очищает не всю решетку, а лишь часть ее, а затем передвигается дальше. Очистной механизм на тросах, оборудованный граблиной или крюком, очень удобен.

Механические решетки, оборудованные граблиной с внутренней стороны, обычно используют на очистных станциях для удаления большого количества твердых примесей. Очистным механизмом служат скребковые грабли, прикрепленные на бесконечной цепи, движущиеся с внутренней стороны решетки. Стержневые решетки, устанавливаемые вертикально или наклонно (от 60 до 80° к горизонту), выступают над уровнем воды, где осуществляется удаление отбросов. Необходимость придания решетке достаточной жесткости ограничивает размеры оборудования. В зависимости от типа решетки отбросы удаляют либо с наружной, либо с внутренней стороны решетки в передвижной приемник или с помощью конвейера.

4.1.2. АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ И ЗАЩИТА МЕХАНИЧЕСКИХ РЕШЕТОК

Периодическое включение систем очистки решеток может осуществляться с помощью электрических таймеров, которые отрегулированы на заданную частоту включения и продолжительность действия, а при очистке сточных вод — с помощью дифференциального детектора потерь напора или же комбинацией двух систем.

Очистной механизм должен быть снабжен устройством для ограничения крутящего момента, чтобы предохранить от повреждения оборудование в случае его перегрузки или забивания решетки.

Закругленные или прямолинейные решетки, очищаемые челночным движением специального устройства, имеют приспособление, которое автоматически останавливает грабли и прекращает очистку решетки во избежание риска заклинивания при повторном пуске механизма.

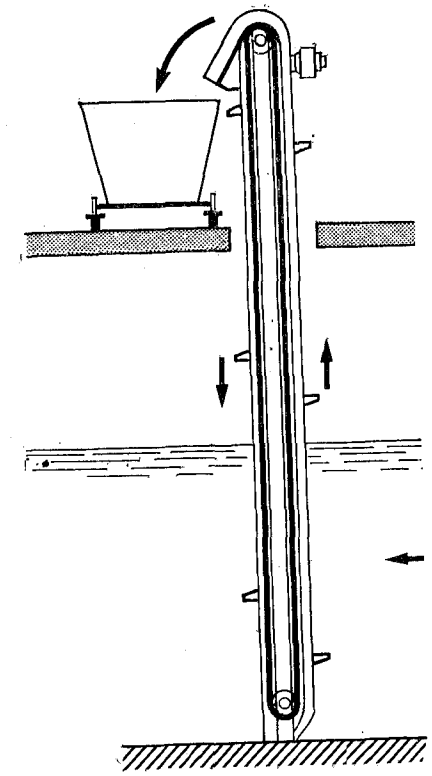


Рис. 4.5. Закрепленная механическая решетка

ТАБЛИЦА 4.1

Тип решетки	Характеристика стока	Расход, м³/ч	Размеры канала, м		Размер прозоров решетки, мм
			глубина	ширина	
Решетки с очистным механизмом с наружной стороны					
Круглая	Среднезагрязненный	10—5000	0,40—1,70	0,30—2,00	12—80 особые 4—10
Рамная	Загрязненный	100—10 000	1,50—5,00	0,6—2,00	12—80
Рамная с двумя тросами	Слабозагрязненный	100—15 000	2,50—10,0	0,6—4,50	12—80
С крюками и тремя тросами	Загрязненный	1000—40 000	2,50—10,0	1,5—5,50	12—100
С непрерывной очисткой с бесконечной цепью	Слабозагрязненный	100—15 000	1,50—8,00	0,8—3,00	12—25 особые 4—10
Решетки с очистным механизмом с внутренней стороны					
С граблинами на бесконечной цепи	Загрязненный	500—15 000	1,50—4,00	0,8—4,00	10—60

4.1.3. СКОРОСТИ ПОТОКА И ПОТЕРИ НАПОРА. ЗАГРЯЗНЕНИЕ РЕШЕТКИ

Скорость потока в прозорах решетки должна быть достаточной, при которой проносятся твердые примеси, но вместе с тем нет избыточных потерь напора и решетки не забиваются отбросами на глубине. Компромиссное решение — выбор приемлемой скорости между максимальной и минимальной. Обычно средняя скорость в прозорах решетки колеблется от 0,6 до 1 м/с и может достигать 1,2—1,4 м/с при максимальном расходе.

Если принятая минимальная скорость не предотвращает оседания песка в канале решетки, то следует предусмотреть перемешивание или другие приемы, чтобы не происходило оседание.

Потери напора в стержневых решетках колеблются от 0,05 до 0,15 м при обработке природной воды и от 0,10 до 0,40 м — при обработке сточной воды. Принимаемые максимальные значения создают необходимый запас надежности, который позволяет учесть возможную частичную блокировку решетки.

4.2. ДРОБЛЕНИЕ ОТБРОСОВ

Дробление твердых отбросов чаще всего применяют при обработке сточной воды. Цель дробления — размельчение твердых примесей, находящихся в воде. Это достигается путем дробле-

ТАБЛИЦА 4.2

Тип комминютора	Расход воды, м³/ч	Максимальная глубина воды в канале, м	Максимальные потери напора, м	Напор на выходе, м	Мощность электродвигателя, кВт
На самотечных линиях	5—8000	0,3—1,20	0,10—0,35		0,25—4
Комминютор-насос	50—300			0—2	7,5—20

ния их в потоке воды, которая подается на последующую обработку. Преимущество данного способа состоит в том, что исключается лишняя ступень обработки, отпадает необходимость удаления отбросов и их размещения.

Однако этот способ имеет и несколько недостатков: возникает необходимость часто ремонтировать оборудование, возможно забивание насосов и труб комьями тряпья, растительными отбросами, покрытыми жиром, а в анаэробных условиях возможно образование флотируемой пены. По этим причинам при проектировании новой очистной станции устройство комминюторов в начале сооружений рекомендуется реже. Комминюторами иногда заменяют тонкие решетки, устанавливаемые для сырого осадка (уплотненного или неуплотненного), если далее следует прямая обработка без сбраживания (теплая обработка, центрифугирование). В этом случае осадок пропускают через комминютор-насос (см. далее), обеспечивающий требуемую степень измельчения. Используют комминютор двух типов: комминюторы на самотечных линиях и комминюторы-насосы (табл. 4.2.). Эти аппараты предназначены главным образом для обработки сточной воды и способны переработать твердые примеси, обычно находящиеся в ней (но только при наличии предварительных грубых решеток с прозорами 50—80 мм в зависимости от используемого оборудования). Твердые примеси измельчают до частиц со средним диаметром в несколько миллиметров.

4.2.1. КОММИНЮТОРЫ НА САМОТЕЧНЫХ ЛИНИЯХ

Применение комминюторов на самотечных линиях снижает потери напора и потребление энергии. Обычные комминюторы состоят из вращающегося барабана с вертикальной осью вращения и горизонтальными прорезями. Их монтируют либо в открытых каналах, либо непосредственно в трубах (при малых габаритах конструкций). Барабан выполнен из круглых прутьев и снабжен зубьями. Режущие ножи прикреплены болтами к гре-

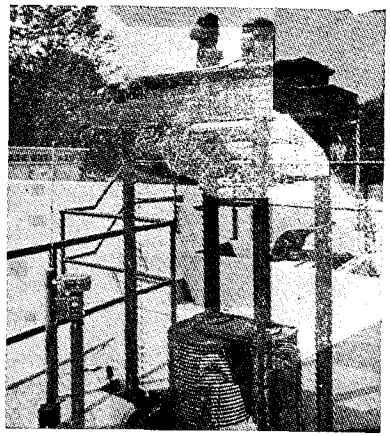


Рис. 4.6. Комминютор для измельчения плавающих отбросов с подъемным механизмом

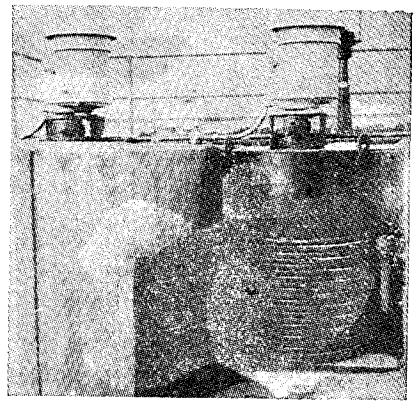


Рис. 4.7. Комминютор Гридуктор, Инфилко Дегремон

бенке. Поток воды проходит в барабан, а твердая фракция улавливается барабаном и постепенно разрывается на мелкие частицы.

4.2.2. КОММИНЮТОРЫ-НАСОСЫ

В этих комминюторах совмещается измельчение примесей с перекачкой раздробленного (водой) вещества. Их устанавливают в трубах, также как и насосы. Однако перекачивающая способность комминюторов-насосов обычно низкая (иногда нулевая) и может потребоваться установка дополнительного насоса. Электродвигатель желательно размещать сверху, чтобы исключить опасность его остановки.

Эти конструкции обычно имеют винт, который проталкивает примеси сквозь режущее устройство. Для регулирования степени измельчения применяют регулирующие лопасти.

4.3. УДАЛЕНИЕ ПЕСКА

Конструкция песколовок должна обеспечивать выделение и удаление из сырой сточной воды гравия, песка и других минеральных частиц, которые забивают каналы и трубы, оказывают абразивное воздействие на внутреннюю поверхность насосов и другого оборудования и создают перегрузки в работе последующих сооружений. Из воды удаляются частицы размером более 200 мкм. Более мелкие частицы извлекаются посредством отстаивания или другими способами.

Теоретическое изучение процесса удаления песка связано с явлением свободного осаждения и включает применение формул, выведенных Стоксом (ламинарный режим), Ньютоном (турбулентный режим) и Алленом (переходный режим (см. с. 70. Эти формулы используют для вычисления скорости седиментации частиц сферической формы. При этом необходимо вводить поправки на форму частиц, концентрацию твердой фазы в суспензии, если она превышает ориентировочно 0,5% и характер потока в горизонтальном направлении.

Для практических целей могут быть использованы следующие данные (для свободно падающих частиц с плотностью 2,65):

d, см	0,005	0,010	0,020	0,030	0,040	0,050	0,10	9,20	0,30	0,50	1,00
v_c, см/с	0,2	0,7	2,3	4,0	5,6	7,2	15	27	35	47	74
v'_c, см/с	0	0,5	1,7	3,0	4,0	5,0	11	21	26	33	—
v''_c, см/с	0	0	1,6	3,0	4,5	6,0	13	25	33	45	65
vI, см/с	15	20	27	32	38	42	60	83	100	130	190

где d — диаметр частиц песка; v_c — скорость оседания в потоке с незначительной горизонтальной скоростью; v'_c — скорость оседания в потоке с горизонтальной скоростью, равной vI; v''_c — скорость оседания в потоке с горизонтальной скоростью, равной 0,30 м/с; vI — критическая горизонтальная скорость потока, при которой частицы песка начинают выпадать на дно.

4.3.1. ВОДОПРОВОДНЫЕ СТАНЦИИ

Впуск воды должен быть запроектирован таким образом, чтобы исключить унос песка. Иногда по местным условиям этого сделать нельзя, тогда следует предусмотреть оборудование для удаления песка, если он не удаляется в другом месте в процессе дальнейшей обработки. Если на станции предусмотрена предварительная обработка, достаточно удалить частицы диаметром больше 0,3 мм, что достигается простым удалением песка в каналах, очищаемых гидравлическим напором потока.

Песок может быть также выделен в центробежном поле (в гидроциклоне, смонтированном на напорном трубопроводе насоса). Гидроциклоны обеспечивают отличное удаление частиц песка размером от 100 до 500 мкм, однако потери напора значительны и могут достичь нескольких метров при минимальном значении 0,50 м для наиболее совершенной конструкции, но несмотря на это остается риск износа насоса вследствие абразивного действия песка. Если станция оборудована тонкими решетками (например, с прозорами от 1 до 2 мм), то песок должен быть удален на предварительной стадии, чтобы исключить возможность повреждения решетки.

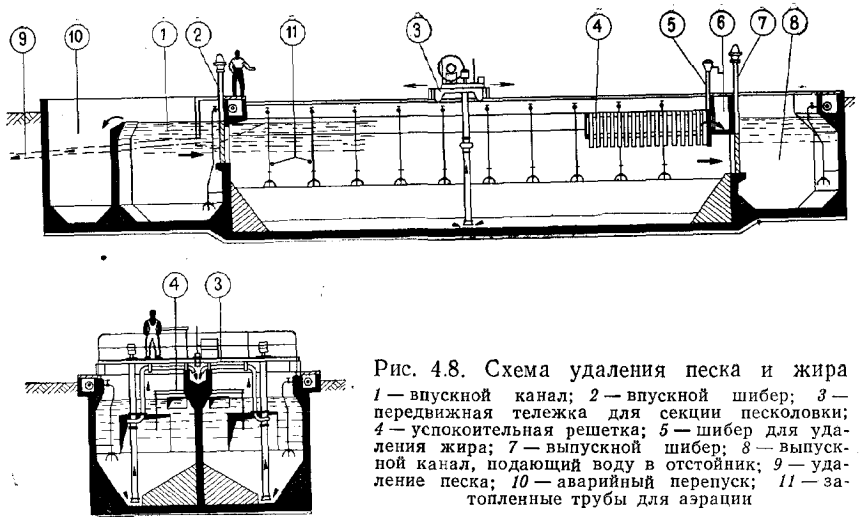


Рис. 4.8. Схема удаления песка и жира
1 — впускной канал; *2* — впускной шибер; *3* — передвижная тележка для секции песколовки; *4* — успокоительная решетка; *5* — шибер для удаления жира; *7* — выпускной шибер; *8* — выпускной канал, подающий воду в отстойник; *9* — удаление песка; *10* — аварийный перепуск; *11* — затопленные трубы для аэрации

Размеры песколовок для конструкции горизонтально-канального типа вычисляют следующим образом. Площадь поверхности определяют как функцию скорости осаждения v_c для наименьших по размеру частиц, которые должны быть удалены, и для максимального притока воды:

$$\text{горизонтальная поверхность} = \frac{\text{максимальный расход}}{\text{скорость осаждения } v_c \text{ мельчайшей удаляемой частицы}}.$$

Площадь живого сечения есть функция задаваемой горизонтальной скорости. Скорость предусматривается большей, чем критическая скорость осаждения частицы vl, если удаление песка проектируется гидравлическим путем, и меньше vI, если предусматриваются скребковые устройства на дне.

4.3.2. КАНАЛИЗАЦИОННЫЕ ОЧИСТНЫЕ СТАНЦИИ

В связи с тем, что сточные воды по составу и степени загрязнения сильно различаются, очистка их значительно сложнее, чем при обработке воды на водопроводных станциях. Прежде всего песок желательно отделить от других твердых примесей, находящихся в воде, в особенности от органических, чтобы он не стал источником каких-либо неприятностей. Однако сделать это трудно. В действительности удаляемый песок всегда содержит некоторую долю органических веществ, которые выделяются из воды одновременно с песком. При скорости потока около 0,3 м/с

органические вещества должны отделяться от песка. Лучший результат достигается при последующей отмывке удаляемого песка, в котором содержание органических веществ составляет 30% и менее.

Применяют следующие основные типы конструкций (приводятся в порядке увеличения размеров и эффективности работы).

Простая песколовка в виде канала, в которой горизонтальная скорость потока пропорциональна расходу, применяется на малых станциях. Песок собирается в продольных лотках на дне, откуда он удаляется обычно каждые 4—5 сут.

Каналы с постоянной скоростью потока около 0,3 м/с. Эти сооружения состоят на одного или предпочтительнее двух каналов, оборудованных на выпуске выравнивающим водосливом (глубина воды пропорциональна ее расходу). Обычно имеется накопительный желоб, очищаемый вручную. Может быть запроектирован также гидравлический транспорт песка в примыкающий бункер, оборудованный механическим устройством для удаления песка. Длительность пребывания воды примерно 1—2 мин.

Круглые песколовки с тангенциальным впуском, механической мешалкой или (что еще лучше) с продувкой воздухом, скорость потока в которых в поперечном сечении у дна поддерживается фактически постоянной вне зависимости от расхода воды. Песок остается в центральном приямке и насосом или эрлифтом перекачивается в отделение для гравитационного обезвоживания. Длительность пребывания воды 2—3 мин.

Аэрируемые прямоугольные песколовки, в которых аэрация обеспечивает вращение жидкости, поддерживая постоянную поперечную скорость вдоль дна под прямым углом к направлению основного потока. Поскольку общее продвижение потока значительно медленнее, то колебания расхода воды не приводят к отрицательным последствиям. Аэрация, кроме того, обусловливая циркуляцию воды, создает перемешивание, которое способствует отделению органических примесей от налипших песчинок.

Песок может быть удален автоматически:

группой эрлифтов, включаемых периодически (извлекают песок со дна приямка);

скребком (укрепленным на конце цепи или скреперного моста), движущимся к сборному приямку, с последующим откачиванием насосами;

непосредственно всасывающим насосом (или эрлифтом), смонтированным на движущемся мостике. Песок обычно отделяется от перекачиваемой эмульсионной жидкости механическим путем, что обеспечивает уменьшение доли органических примесей в песке, собираемом в накопителях. Проектируются на длительность пребывания около 3—5 мин, максимальную

гидравлическую нагрузку около 70 м³ воды/м² площади поверхности в час с максимальной длиной песколовки 30 м. Такие песколовки задерживают около 80% песка с размером частиц от 250 мкм (при максимальном расходе) до 150 мкм (при минимальном расходе).

4.3.3. ПЕСКОЛОВКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ СТОКОВ

Для стоков металлургических или иных промышленных предприятий выделение песка и других неорганических веществ с размером частиц 100—250 мкм и более может быть осуществлено двумя способами:

либо в песколовке со скребком, круглой в плане, диаметром около 5—15 м (с центральным впуском и периферийным выпуском), или квадратной (с впуском потока вдоль одной стороны и выпуском с другой), с высотой жидкости около 1 м и с гидравлической нагрузкой около 15—30 м³ стока на 1 м² площади поверхности в час. Вращающийся скребок с центральным приводом сдвигает песок в боковой сборный приямок. Выгрузка механическая; достигается с помощью архимедова винта или скребка с возвратно-поступательным ходом;

либо в гидроциклоне под давлением при скорости на впуске, сниженной до 2—3 м/с для предотвращения абразивного действия. Диаметр циклона от 300 до 700 мм. Производительность до 500 м³/ч. Потери напора около 2—3 м. Выгрузка непрерывная при концентрации неорганических примесей около 10%. Снабжен сифоном, определяющим нижний уровень жидкости, что позволяет получить концентрацию до 20%, если правильно подобран диаметр выходящего патрубка.

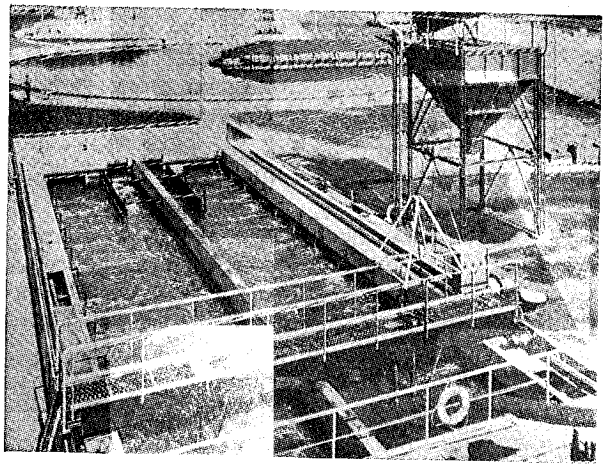


Рис. 4.9. Прямоугольная аэрируемая песколовка

4.4. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ВОДЫ ИЗ ПОВЕРХНОСТНЫХ ИСТОЧНИКОВ

Предварительная обработка проводится перед осветлением поверхностной воды, если она содержит большое количество взвешенных веществ. Процесс представляет собой предварительное отстаивание, в результате чего удаляется весь мелкий песок и значительная часть взвеси.

Уровень концентрации взвешенных веществ в исходной воде, при котором их предварительное удаление становится необходимым, зависит от конструкции основного осветлителя. Этот уровень может быть около 2 г/л для осветлителя без скребков и около 5—10 г/л для осветлителя со скребковым устройством.

В зависимости от нагрузки по взвешенным веществам и их состава сооружение для предварительной обработки может быть запроектировано в виде осветлителя (это основной прием для обработки сырой воды, если концентрация в ней не превышает 20—30 г/л) или в виде уплотнителя, если концентрация взвешенных веществ выше указанного предела.

При низкой нагрузке по взвеси можно использовать обычное отстаивание без реагентов. Но с увеличением нагрузки по взвеси необходимо использовать реагенты, чтобы получить требуемую высокую степень осветления. Если же нагрузка продолжает увеличиваться, то происходит не свободное, а стесненное осаждение взвеси. Вообще говоря, этот процесс не улучшается при использовании коагулянтов, таких как сульфат алюминия или хлорид железа. Положительный результат при стесненном осаждении достигается лишь путем использования специальных электролитов. Фактически обработка воды — это начало обработки осадков и граница между этими двумя процессами определяется главным образом видами образующихся осадков.

Если сооружение для предварительной обработки работает в режиме осветлителя, то восходящая скорость изменяется в пределах от 2 до 6 м/ч в зависимости от требуемой концентрации взвеси на выходе, состава взвеси, а также от того, используются ли реагенты.

Длительность обработки зависит от нагрузки по взвешенным веществам, их плотности и требуемой концентрации взвеси в выходящей воде. Обычно она колеблется от 1 до 2 ч. Если нагрузка высокая или седиментационные свойства взвеси слабо выражены, то конструкция сооружения предусматривается по типу уплотнителя. В этом случае восходящая скорость потока ниже (колеблется от 2 до 0,5 м/ч, а иногда и еще меньше) и длительность обработки составляет от 2 до 5 ч.

Эффективность осветления без добавления реагентов составляет от 50 до 65%. Она может достигать 75—98% при добавке соответствующих доз флокулянтов, обычно около $^1/_3$ той дозы, которая определяется джар-тестом. Если процесс протекает по

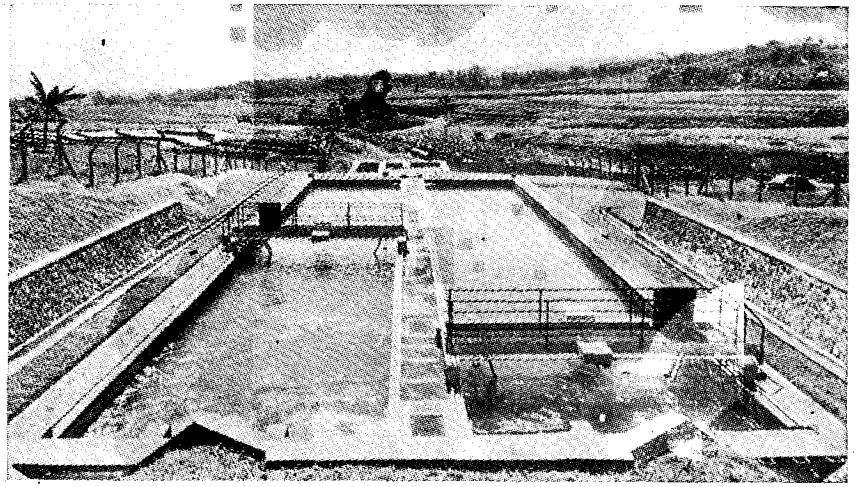


Рис. 4.10. Сооружение для предварительной обработки воды (Бандунг, Индонезия)

типу зонного осаждения, то нужно увеличить дозы полиэлектролитов, из-за чего очень скоро вода становится непригодной для промышленных целей. Фактически только очень малые количества полиэлектролитов (около 1 мг/л) разрешаются правилами в соответствии с требованиями к качеству питьевой воды.

Подобно осветлителям сооружения для предварительной обработки круглые или прямоугольные в плане. Осадок удаляется следующим образом:

без скребков, гравитационным удалением из прилегающего приямка;

без скребков, всасывающими насосами, смонтированными на мостике, движущемся со скоростью 1—3 см/с. Мостик может быть оборудован водяными инжекционными насосами для размыва собирающегося осадка и передвижения его к всасывающим насосам;

со скребками, из одного или нескольких приямков, с удалением осадка под гидростатическим напором или специальными насосами.

Расчет сооружений требует точных знаний об объемах образующихся осадков в наиболее критические периоды и о седиментационных характеристиках этого осадка.

4.5. УДАЛЕНИЕ НЕФТИ И ЖИРОВ

В процессе удаления нефти и жиров возникает ряд проблем, и в частности необходимость удаления:

нефти из поверхностных вод перед их основной обработкой и

жиров из городских стоков перед их сбросом в систему канализации;

жиров на городских канализационных очистных сооружениях (в качестве предварительной обработки);

нефтесодержащих веществ из сточных вод переработки нефти и нефтехимических заводов;

нефти из пароконденсата перед повторным его использованием (см. конденсаты, с. 710).

Процесс удаления нефти предусматривает разделение фаз жидкость — жидкость, а удаление жиров — разделение фаз твердое — жидкость (при условии, что температура воды достаточно низкая, чтобы обеспечить пребывание жира в твердом состоянии).

Нефть и жиры обычно легче воды и имеют тенденцию всплывать на поверхность. Нефте-жиросепаратор представляет собой накопительный резервуар, в котором при снижении скорости движения потока обеспечивается соответствующий поверхностный эффект. Поверхность очищается, если это возможно, выносом верхнего слоя жидкости в случае удаления нефти (или передвижением этого слоя с помощью скребкового механизма) или же сгребанием жира.

4.5.1. УДАЛЕНИЕ НЕФТИ ИЗ ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОД

Цель заключается в удалении некоторых свободных нефтепродуктов, которые могут попасть с водой на последующие ступени обработки.

Рекомендуется использовать обычную флотацию в начале очистных сооружений (на входе воды или вдоль входного канала). Нефтепродукты задерживаются обратным водосливом, в то время как вода протекает под ним. Собранные на поверхности всплывшие примеси удаляются с помощью расположенного вверху специального неподвижного или подвижного водослива (вращающейся трубы).

4.5.2. УДАЛЕНИЕ ЖИРОВ ИЗ СТОЧНЫХ ВОД ПЕРЕД СБРОСОМ ИХ В КАНАЛИЗАЦИОННУЮ СЕТЬ

Такая «at = source» (у места образования) предварительная обработка рекомендуется для малых промышленных предприятий, ресторанов, небольших общественных предприятий и т. п., что часто требуется соответствующим законодательством. С этой целью применяют стандартные жиросепараторы (или жиробоксы) промышленного изготовления производительностью 20—30 л/с. Длительность обработки 3—5 мин с преобладающей скоростью оседания около 15 м/ч.

При правильной эксплуатации эти конструкции обеспечивают удаление твердых жировых веществ до 80% и накапливают

до 40 л легких веществ на каждый 1 л/с расхода. Необходимо регулярно очищать сепаратор. Температура воды на выходе из сепаратора должна быть меньше 30 °С. Проектирование сепаратора должно по возможности предусматривать предотвращение выделения на дно тяжелых примесей, но можно доказать полезность устройства жиробокса типа отстойника с временем пребывания воды в нем от 1 до 3 минут.

4.5.3. УДАЛЕНИЕ ЖИРОВ КАК ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА НА СТАНЦИЯХ ОЧИСТКИ БЫТОВЫХ СТОКОВ

Первичный отстойник хорошо приспособлен к выделению жиров, которые поднимаются на поверхность, но он обычно мало пригоден для сбора больших количеств жира, что вызывает затруднения в эксплуатации.

Удаление жиров из бытовых стоков желательно (в особенности, если нет первичного отставания), и оно чаще всего комбинируется с удалением песка (путем устройства спокойной зоны в одной части аэрируемой песколовки; жиры и пена удаляются либо с верхним слоем воды либо путем сгребания их с поверхности). Размеры песколовки должны быть увеличены, чтобы обеспечить эту дополнительную обработку.

Конструкция включает аэрируемую зону, в которую у днища вводится воздух, и неаэрируемую зону, где жиры поднимаются на поверхность. Задерживаемый осадок по наклонным стенкам сползает вниз и остается в аэрируемой зоне. Средняя длительность пребывания стоков в сооружении от 10 до 15 мин при среднем расходе с минимальным значением 5 мин. Жиры удаляются либо током воды с поверхности, либо механическим скребком. Расход подаваемого воздуха около 0,5—2 м³/ч на 1 м³ объема сооружения. При соблюдении указанных выше условий можно задержать до 80% жиров.

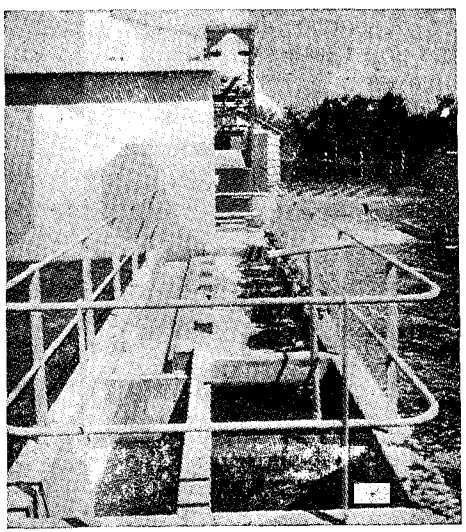


Рис. 4.11. Удаление жира с помощью воздуха (обработка стоков скотобойни)

Самостоятельное выделение жиров может быть рекомендовано в том случае, если сточные воды

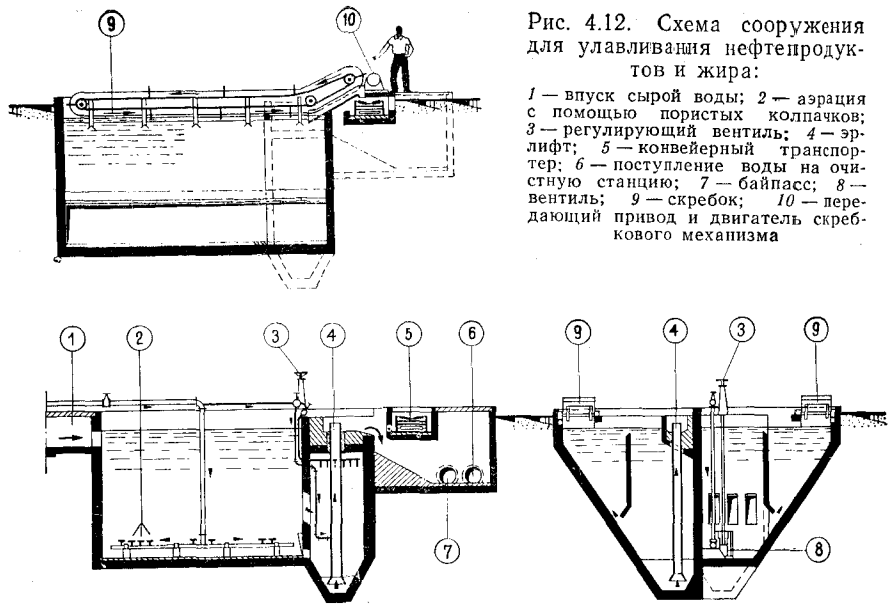


Рис. 4.12. Схема сооружения для улавливания нефтепродуктов и жира:

1 — впуск сырой воды; *2* — аэрация с помощью пористых колпачков; *3* — регулирующий вентиль; *4* — эрлифт; *5* — конвейерный транспортер; *6* — поступление воды на очистную станцию; *7* — байпасс; *8* — вентиль; *9* — скребок; *10* — передающий привод и двигатель скребкового механизма

содержат большое количество жира. В этом случае проектируется успокоительная зона, где вертикальная скорость потока составляет 15—20 м/ч (максимальное — 25 м/ч).

Устройство специальных сооружений для удаления жиров иногда используют с целью частичной обработки некоторых производственных сточных вод, поступающих с боен скота и мясокомбинатов, перед выпуском этих вод в канализацию, что предохраняет городскую канализационную систему от накапливания в ней избыточного количества жиров.

Для очистки некоторых сточных вод (например, с сильно выраженным восстановительным характером или с высоким содержанием аммиака) желательно применять предварительную аэрацию. Ее проектируют на длительность обработки до 30 мин с соответствующей подачей воздуха. Жироловки не рассчитаны на задержание масел и углеводородов, поступление последних в систему канализации не разрешается.

4.5.4. ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЕ УДАЛЕНИЕ НЕФТИ ИЗ СТОЧНЫХ ВОД НЕФТЕОЧИСТИТЕЛЬНЫХ, НЕФТЕХИМИЧЕСКИХ И ДРУГИХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Эти стоки содержат различное количество углеводородов, которые находятся как в свободном, так и частично растворенном или эмульгированном состояниях в большей или меньшей

степени. Полное удаление нефти требует двухступенчатой обработки: предварительного удаления под действием сил тяжести, без добавления реагентов, что снижает содержание углеводородов до 15—100 мг/л, и окончательного удаления (напорной флотацией, фильтрованием, коалесценцией) с использованием реагентов (коагулирование солями металлов или катионными полиэлектролитами), обеспечивающего полную очистку.

Предварительное удаление нефти обусловливается обычной флотацией капель нефти. Она проводится в сооружениях различных типов.

Обычные нефтеловушки горизонтального типа — это прямоугольные в плане сооружения с продольным движением жидкости. Они оборудованы специальным распределительным устройством, механическими скребками (на поверхности и на дне) и имеют раздельные выпуски для обработанной воды, нефти с поверхности и выпавшего осадка.

Американский нефтяной институт составил подробную инструкцию (Стандарты API) для проектирования, расчетов и строительства сооружений этих типов на основании следующих условий:

теоретический диаметр капель нефти предполагают равным $d>0{,}015$ см;

площадь поверхности в плане вычисляют с учетом значений вертикальной скорости, принимаемой в пределах 0,9—3,6 м/ч;

площадь поперечного сечения подсчитывают по горизонтальной скорости, принимаемой равной 18—55 м/ч, что в 15 раз больше вертикальной скорости;

отношение рабочей глубины к ширине принимают равным от 0,3 до 0,5;

ширина должна быть максимальная 6 м, минимальная 2 м; а рабочая глубина 2,5 м (максимальная) и 1 м (минимальная).

Такого типа нефтеловушки пригодны для высоких нагрузок (по нефти) и при значительных колебаниях концентрации. На практике их используют для уменьшения содержания углеводородов приблизительно до 15—100 мг/л в зависимости от начальной концентрации эмульгированных веществ.

Использование сооружений с двумя последовательными отделениями обеспечивает более высокую эффективность удаления нефти.

Нефтеловушки радиального типа со скребками, дешевые в строительстве, просты в эксплуатации и обеспечивают ту же эффективность. Они функционируют при вертикальной скорости 5—15 м/ч в зависимости от требуемой длительности пребывания.

Нефтеловушки полочные — это тонкослойные сепараторы, в которых капли нефти движутся кверху очень короткое расстояние, равное прозору между пластинами (20—100 мм). Их преимущество заключается в компактности и большей эффективности удаления относительно тонких фракций нефти.

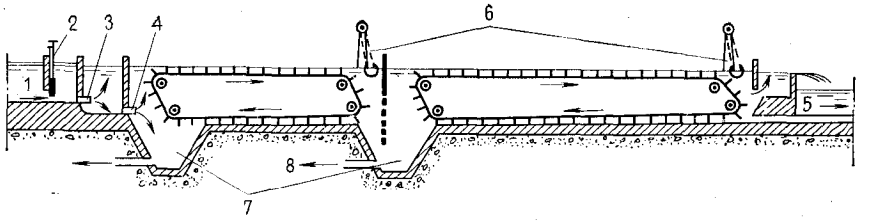


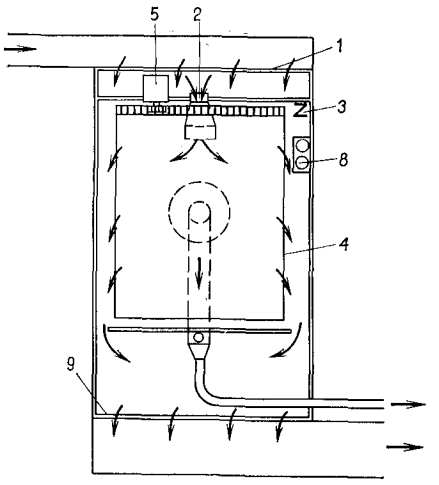
Рис. 4.13. Схема горизонтальной нефтеловушки с двумя отделениями, работающими последовательно:

1 — впуск; *2* — перегородка; *3* — предварительный распределитель; *4* — основной распределитель; *5* — выпуск; *6* — трубопроводы круглого сечения для сбора нефти; *7* — приямки для осадка; *8* — насосы для удаления осадка

В полочных нефтеловушках можно очищать стоки со средним количеством нефти и незначительным количеством осадков, парафина, асфальта, жиров во избежание заиливания сооружения. Чтобы избежать значительного снижения пропускной способности сооружения, необходимо добавлять уголь на стадии предварительной обработки.

4.6. ТОНКОЕ ПРОЦЕЖИВАНИЕ

Тонкое процеживание — это процесс фильтрования через материал с мелкими отверстиями, широко используемый в системах обработки воды. В зависимости от размеров отверстий фильтрующего материала различают макро- и микропроцеживание. Путем макропроцеживания (через перфорированную



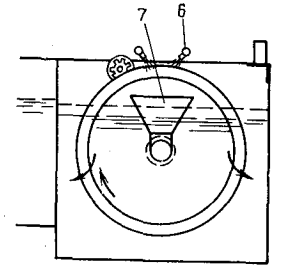


Рис. 4.14. Схема микрофильтра:

1 — подающий водослив; *2* — впускной шибер; *3* — предохранительный клапан; *4* — барабан микросита; *5* — привод; *6* — промывная головка с соплами; *7* — промывной канал с системой труб; *8* — детектор потерь напора; *9* — выпускной водослив

стальную пластину или металлическую проволочную сетку с размером отверстий более 0,3 мм) удаляют некоторые взвешенные вещества, всплывающие и плавающие примеси, остатки животных и растительных тканей, насекомых, веточек, водорослей, травы и т. п., имеющие размеры от 0,2 до нескольких миллиметров. Микропроцеживание (через пластиковый или металлический материал с размером отверстий менее 100 мкм) применяют для удаления очень тонкой взвеси из питьевой воды (планктона) или из предварительно обработанной сточной воды (см. гл. 9).

Для макропроцеживания используют проточные конструкции с низкими потерями напора (вращающиеся макросита, сита с укрепленным скребком) и конструкции, требующие установки насоса: (неподвижные или вращающиеся самоочищающиеся сита, механические фильтры).

4.6.1. ВРАЩАЮЩИЕСЯ МАКРОСИТА

Эти сита, используемые в процессе подготовки питьевой воды, воды для орошения или получения стоков высокой частоты, представляют собой либо горизонтально смонтированные барабаны, если уровень воды относительно постоянен, или же вращающиеся сита из непрерывной сетки, если уровень воды изменяется в значительных пределах (до нескольких метров). Производительность их составляет от нескольких сотен литров в секунду до более чем 10 м³/с.

Сито представляет собой ряд чередующихся фильтровальных полотен, выполняемых обычно из плетеных металлических прутьев (из бронзы или нержавеющей стали), смонтированных на жестком каркасе.

Размер пор может быть 0,3—3 мм, а диаметр проволоки 0,25—1 мм.

Сетка макросита защищается обычно установкой решетки с прозорами между прутьями 40—50 мм для сетки из проволоки диаметром до 1 мм, 20—30 мм — для сетки из проволоки диаметром до 0,5 мм и 10—15 мм — для проволоки диаметром до 0,3 мм.

Коэффициент площади свободной поверхности составляет около 50 или 60% и скорость фильтрования (отношение расхода воды к площади свободной поверхности сита, погруженного в воду) обычно 0,35—0,40 м/с.

Предпочтительное направление фильтрования — изнутри наружу, что облегчает промывку сетки и удаление задержанных примесей.

Автоматический контроль процесса промывки позволяет ограничить потери напора до 20 см при нормальной эксплуатации. Сита могут выдерживать максимальный напор 50 см.

4.6.2. СИТА С ФИКСИРОВАННЫМ СКРЕБКОМ

Сточные воды, поступающие от боен, производства пищевых консервов и т. д., должны быть профильтрованы до поступления на основные сооружения очистной станции. Наибольший эффект фильтрования достигается на механически очищаемых решетках или ситах. Взвешенные вещества остаются на неподвижной пластине из нержавеющей стали с отверстиями 2—5 мм в диаметре. Задержанные примеси удаляются скребком или

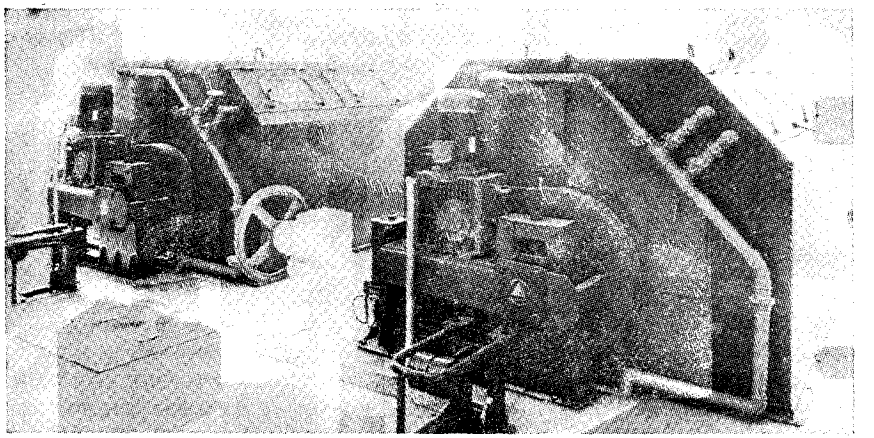


Рис. 4.15. Вращающиеся микрофильтры

щеткой, укрепленной на конце цепи (для прямого сита, наклоненного к горизонтали под углом 45—60°), или же вращающимся устройством (для круглых сит) и выпускаются в сборник через сбросное отверстие.

Сточные воды, содержащие жировые вещества, способные затвердевать, могут забивать сита, даже если размер отверстий тщательно подобран, поэтому необходимо предварительно удалять жир.

Оборудование может быть размещено в каналах шириной 1—2,5 м. Оно способно обработать 100—2000 м³/ч воды. При нормальной эксплуатации потери напора не должны превышать 0,5 м.

4.6.3. НЕПОДВИЖНЫЕ ИЛИ ВРАЩАЮЩИЕСЯ САМООЧИЩАЮЩИЕСЯ СИТА

Сита с размером отверстий 0,25—2 мм используют для стоков, главным образом от предприятий пищевой промышленности.

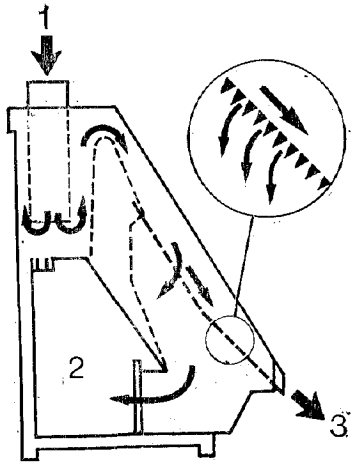


Рис. 4.16. Схема неподвижного сита: *1* — впуск сырой воды; *2* — фильтрат; *3* — твердые примеси

Неподвижные сита состоят из решетки, выполненной из тонких горизонтально расположенных прутьев, укрепленных в раме из нержавеющей стали. Прутья могут быть круглого, прямоугольного или треугольного сечения. Сток подается в верхнюю часть сита, наклон которого к горизонтали постепенно уменьшается от 0,65 до 45° у дна. В этом случае эффективность работы сита по улавливанию, подсушиванию и удалению примесей наиболее удовлетворительна.

Вращающиеся сита состоят из цилиндрической решетки с горизонтальной осью вращения, с прутьями из нержавеющей стали трапецеидального сечения. Сита медленно вращаются. Задерживаемые примеси остаются на решетке и снимаются с нее неподвижным скребком, затем удаляются.

Неподвижные и вращающиеся сита рассчитаны на обработку 10—1000 м³/ч воды в зависимости от их типа и требуемой степени очистки. Для этих сит допустимые потери напора составляют около 2 м. Как и другие (с фиксированным скребком) эти сита подвержены опасности забивания затвердевающими жировыми веществами.

4.6.4. МЕХАНИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ

При относительно низких расходах воды взвешенные вещества могут быть уловлены механическими фильтрами, работающими под давлением, создаваемым насосами.

Дегремон и ряд других фирм предполагают широкий выбор оборудования:

циклонные фильтры с тангенциальным впуском в верхнюю часть, фильтровальным цилиндром из нержавеющей стали. Размер отверстий от нескольких десятков миллиметров до нескольких миллиметров. Фильтры промывают вручную или автоматически сырой или же фильтрованной водой. Производительность 100—500 м³/ч в зависимости от модели. Потери напора составляют несколько метров.

Непрерывно очищающиеся вращающиеся фильтры со съемными фильтровальными элементами, выполненными из фарфора или нержавеющей стали (размер отверстий 0,1—1,6 мм), укрепленными на вращающемся устройстве. Очистка происходит, когда фильтровальные элементы попадают под струю воды. Задержанные примеси смываются противоточным движением воды. Производительность фильтра изменяется в зависимости от модели в пределах 25—7000 м³/ч. Потери напора составляют несколько метров. Расход воды при непрерывной промывке составляет 2—5% количества фильтруемой воды.

Автоматические фильтры с множеством фильтровальных трубок и вращающимся промывным устройством. Производительность 100—10000 м³/ч. Минимальный размер отверстий 125 мкм. Потери напора — несколько метров. Расход промывной воды 1—2% количества фильтруемой воды.

4.7. УДАЛЕНИЕ И ОБРАБОТКА ПЕСКА И ОТБРОСОВ, ВЫДЕЛЕННЫХ ИЗ СТОЧНЫХ ВОД

4.7.1. ОТБРОСЫ С РЕШЕТОК

Отбросы, снятые с решеток, удаляют вручную (в корзинах, перфорированных или обычных, в узкоколейных тележках или вагонетках), механически (ленточным конвейером, движущимся непрерывно, или возвратно-поступательно) и гидравлически (смывом напорной струей в специальный желоб).

Объем отбросов на станциях обработки городских сточных вод составляет примерно 2—5 л на 1 жителя в год при прозорах решетки 30—50 мм и 5—10 л на 1 жителя в год при прозорах 10—25 мм.

Отбросы чаще всего транспортируют на свалку или на сжигание. Их можно сжигать в специальных печах, на очистных станциях или же совместно с городским мусором на мусоросжигательных станциях. Температура горения должна быть выше 800 °С, чтобы исключить появление неприятных запахов.

Для облегчения транспортирования отбросы можно спрессовать в специально проектируемых гидравлических прессах.

4.7.2. ПЕСОК ИЗ ПЕСКОЛОВОК

Объем удаляемого песка из песколовок составляет 5—12 л на одного жителя в год.

Песок, выгружаемый вручную лопатами из небольших песковых каналов, обычно непригоден для повторного использования и должен быть либо прокален, либо вывезен вместе с отбросами. На больших станциях песок, удаляемый из песколовок насосами, может быть отделен затем от воды следующим путем:

осаждением в мелких резервуарах (воду затем дренируют через донный фильтр или же удаляют через верхний водослив);

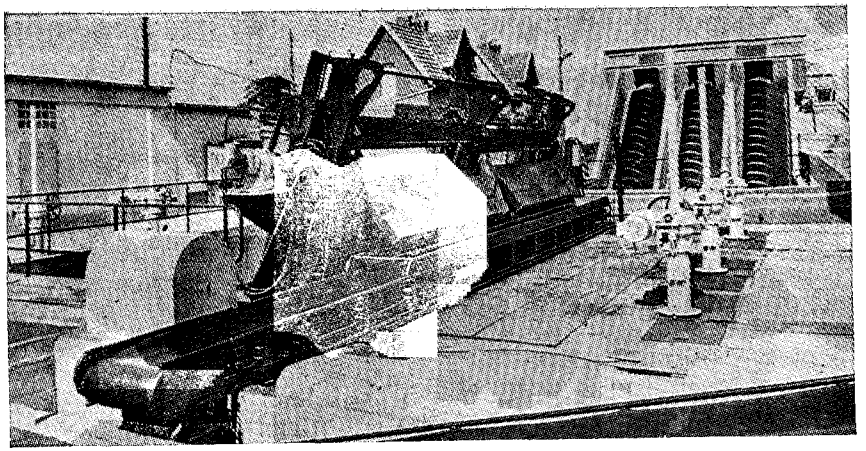


Рис. 4.17. Удаление отбросов ленточным конвейером

механическим способом (например, с помощью Архимедова винта или скребком с возвратно-поступательным движением). Песок передается затем в неподвижный бункер или в передвижную вагонетку;

отделением в гидроциклоне с последующей передачей в бункер, оборудованный верхним водосливом;

отделением в гидроциклоне с последующим удалением винтовым конвейером в накопительный бункер или вагонетку.

На очень крупных станциях песок перед подачей в бункер отмывают водой в специальном резервуаре. Промывной резервуар оборудуют устройством для аэрирования, чтобы улучшить процесс промывки. Промывка водой может быть осуществлена и в архимедовом винте. Отмытый должным образом песок может быть использован повторно на этих же станциях (для иловых площадок).

4.7.3. ЖИРЫ И ПЕНА

Жировые вещества и пену, удаляемые с поверхности песколовок, жироловок и первичных отстойников, обычно не регенерируют. Если все эти виды отбросов содержат много органических веществ, то тогда их можно присоединить к осадкам, подвергающимся анаэробному сбраживанию (что увеличивает выход газа). Но такой прием приводит к образованию слоя пены в метантенке, что в свою очередь требует установки оборудования для эффективного перемешивания. Отбросы можно оставлять в специальном резервуаре для уплотнения (с дроссельным выпускным отверстием верхнего слоя воды, который возвращается в начало очистной станции; из отбросов удаляется избыточное количество воды) и периодически удалять из него в тележку с помощью вакуума.

Если в систему станции включено сжигание осадков или отбросов, то жиры и флотируемую пену тоже можно сжечь. Предпочтительнее накапливать масло- и нефтесодержащие стоки от гаражей, а также нефтестоки от промывки резервуаров на городских очистных станциях. После длительного периода их накопления нефть, концентрирующуюся на поверхности, экстрагируют и сжигают.

5. КОАГУЛЯЦИЯ И ФЛОКУЛЯЦИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ОЧИСТКИ ВОДЫ

5.1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Малый размер коллоидных частиц загрязнений, присутствующих в воде, и отрицательный заряд, распределенный на поверхности этих частиц, обусловливают высокую стабильность коллоидных систем[1].

В технологии очистки воды коагуляцией называется процесс, с помощью которого осуществляется дестабилизация коллоидных частиц вследствие нейтрализации, их электрического заряда. Вещество, используемое для нейтрализации, называется коагулянтом.

Флокуляция — это слипание дестабилизированных частиц при их контакте друг с другом в процессе перемешивания. В результате флокуляции образуются хлопья, которые могут быть выделены путем отстаивания или фильтрования на последующих стадиях очистки воды. Образование хлопьев может быть ускорено применением некоторых веществ, называемых флокулянтами. Выделение хлопьев из воды может осуществляться только фильтрованием или отстаиванием или флотацией с последующим фильтрованием.

Коагуляция и флокуляция часто используются при подготовке питьевой воды и воды для нужд производства. При этом происходит нейтрализация коллоидных частиц, загрязнений, содержащихся в воде, и адсорбция их на поверхности образующихся при флокуляции хлопьев. Некоторые растворенные вещества также могут быть адсорбированы хлопьями (органические вещества, различные загрязнения, попавшие в водоемы и т. д.).

В случае очистки бытовых сточных вод концентрация взвешенных веществ часто оказывается настолько высокой, что флокуляция может быть вызвана путем одного лишь перемешива-

[1] См. гл. 3, где изложены теоретические положения процессов, описываемых в этой главе.

ния. При этом для извлечения растворенных загрязнений также можно вводить коагулянт.

Состав промышленных сточных вод широко изменяется в зависимости от вида производства. В некоторых случаях для очистки достаточно только провести флокуляцию, так как сточная вода уже содержит вещество, способное к флокуляции после перемешивания или введения флокулянта. В других случаях необходимо использовать коагулянт, способный образовывать частицы твердой фазы, которые затем могут быть сфлокулированы.

5.2. КОАГУЛЯЦИЯ

Коагуляция заключается в том, что в воду вводят вещество, которое может нейтрализовать обычно присутствующие в воде отрицательно заряженные коллоидные частицы загрязнений и инициировать процесс осаждения. Это вещество называется коагулянтом (см. с. 65).

5.2.1. ОСНОВНЫЕ КОАГУЛЯНТЫ

Наиболее широко применяют коагулянты на основе солей алюминия или железа. В некоторых случаях используют синтетические вещества такие, как катионные полиэлектролиты. Действие солей металлов состоит в нейтрализации катионом металла отрицательного заряда коллоидных частиц, присутствующих в воде.

Катионные полиэлектролиты получили свое название потому, что они несут положительные заряды, которые непосредственно нейтрализуют отрицательно заряженные коллоидные частицы. Катионные полиэлектролиты обычно используют в комбинации с солями металлов, что позволяет существенно снизить дозу минеральных коагулянтов. Иногда катионные полиэлектролиты применяют без минеральных коагулянтов, что приводит к значительному уменьшению объема осадка, образующегося при очистке воды.

5.2.1.1. Соли алюминия.

Сульфат алюминия (жидкий или сухой):

$$Al_2(SO_4)_3 + 3Ca(HCO_3)_2 \rightarrow 3CaSO_4 + 2Al(OH)_3 + 6CO_2.$$

Доза: при очистке природных вод 10—150 г товарного продукта на 1 м³ воды в зависимости от качества исходной воды; при чистке сточных вод 100—300 г/м³ в зависимости от качества обрабатываемой воды и требуемой степени очистки.

Хлорид алюминия (жидкий). Этот реагент используют только в исключительных случаях:

$$2AlCl_3 + 3Ca(HCO_3)_2 \rightarrow 2Al(OH)_3 + 3CaCl_2 + 6CO_2.$$

Сульфат алюминия + гашеная известь:

$$Al_2(SO_4)_3 + 3Ca(OH)_2 \rightarrow 3CaSO_4 + 2Al(OH)_3.$$

Соотношение: при очистке природных вод одна часть $Ca(OH)_2$ (извести) на три части $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ (товарный сульфат алюминия), а при очистке бытовых сточных вод 100—200 г/м³ извести на 150—500 г/м³ товарного сульфата алюминия.

Сульфат алюминия + каустическая сода:

$$Al_2(SO_4)_3 + 6NaOH \rightarrow 2Al(OH)_3 + 3Na_2SO_4.$$

Соотношение: при очистке природных вод необходимое количество NaOH составляет 36% дозы $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ (товарный сульфат алюминия).

Сульфат алюминия + карбонат натрия:

$$Al_2(SO_4)_3 + 3Na_2CO_3 + 3H_2O \rightarrow 2Al(OH)_3 + 3Na_2SO_4 + 3CO_2;$$

$$Al_2(SO_4)_3 + 6Na_2CO_3 + 6H_2O \rightarrow 2Al(OH)_3 + 3Na_2SO_4 + 6NaHCO_3.$$

Соотношение: одна часть безводного карбоната натрия на одну или две части $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ (товарный сульфат алюминия).

Алюминат натрия:

$$NaAlO_2 + Ca(HCO_3)_2 + H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + CaCO_3 + NaHCO_3;$$

$$2NaAlO_2 + 2CO_2 + 4H_2O \rightarrow 2NaHCO_3 + 2Al(OH)_3.$$

Дозы: при очистке природных вод 5—50 г/м³ товарного алюмината натрия (содержание Al_2O_3 — 50%).

Полимеры алюминия. В некоторых условиях соли алюминия могут конденсироваться, образуя полимеры, способные к коагуляции и флокуляции. Так, основной полихлорид алюминия (ВАРС) образуется медленной нейтрализацией раствора хлорида алюминия каустической содой.

Полимеры получают в виде соединений от $Al_6(OH)_{12}^{6+}$ до $Al_{54}(OH)_{144}^{8+}$ с высокими коагулирующими и флокулирующими свойствами. ВАРС приготовляют на месте применения (запатентованный процесс). Однако другие реагенты (поставляемые под различными марками, например WAC) можно изготовлять и хранить в течение долгого времени благодаря стабильности, которую этим реагентам придают введением различных добавок (например, аниона сильной кислоты — SO_4^{2-}).

5.2.1.2. Соли железа.

Хлорид железа (обычно жидкий, иногда кристаллический):

$$2FeCl_3 + 3Ca(HCO_3)_2 \rightarrow 3CaCl_2 + 2Fe(OH)_3 + 6CO_2.$$

Дозы: при очистке природных вод 5—150 г/м³ $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ (товарный хлорид железа), а при очистке бытовых сточных вод 100—500 г/м³ $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ (товарный хлорид железа).

Хлорид железа + известь:

$$2FeCl_3 + 3Ca(OH)_2 \rightarrow 3CaCl_2 + 2Fe(OH)_3.$$

Дозы: при очистке бытовых сточных вод 100—800 г/м³ извести на 100—600 г/м³ $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ (товарный хлорид железа).

Сульфат железа (III):

$$Fe_2(SO_4)_3 + 3Ca(HCO_3)_2 \rightarrow 2Fe(OH)_3 + 3CaSO_4 + 6CO_2.$$

Дозы: при очистке природных вод 10—150 г/м³ $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$ (товарный продукт).

Сульфат железа (III) + гашеная известь:

$$Fe_2(SO_4)_3 + 3Ca(OH)_2 \rightarrow 2Fe(OH)_3 + 3CaSO_4.$$

Соотношение: при очистке природных вод потребность в извести [по $Ca(OH)_2$] составляет 40% количества сульфата железа $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$.

Сульфат железа (II):

$$FeSO_4 + Ca(HCO_3)_2 \rightarrow Fe(OH)_2 + CaSO_4 + 2CO_2.$$

Дозы: при очистке природных вод 10—100 г/м³ $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (товарный продукт); при очистке сточных вод 200—400 г/м³ $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ (товарный продукт); при аэрации воды гидроксид железа (II) окисляется и переходит в гидроксид железа (III).

$$2Fe(OH)_2 + \frac{1}{2}O_2 + H_2O \rightarrow 2Fe(OH)_3.$$

Сульфат железа (II) + хлор:

$$2FeSO_4 + Cl_2 + 3Ca(HCO_3)_2 \rightarrow 2Fe(OH)_3 + 2CaSO_4 + CaCl_2 + 6CO_2.$$

Соотношение: потребность в хлоре составляет 12% количества $FeSO_4 \cdot 7H_2O$. Сульфат железа (II) и хлор можно вводить в обрабатываемую воду отдельно. Раствор сульфата двухвалентного железа можно также окислить хлором перед использованием. При этом образуется смесь сульфата и хлорида трехвалентного железа — продукта, широко известного под названием «хлорсульфат железа», — по следующей реакции:

$$3FeSO_4 + \frac{3}{2}Cl_2 \rightarrow Fe_2(SO_4)_3 + FeCl_3.$$

Сульфат железа (II) + гашеная известь:

$$FeSO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow Fe(OH)_2 + CaSO_4.$$

Дозы: при очистке природных вод потребность в $Ca(OH)_2$ (гашеной извести) составляет 26% количества $FeSO_4 \cdot 7H_2O$. При обработке сточных вод 100—150 г/м³ извести на 250—350 г/м³ сульфата двухвалентного железа.

Хлорид железа (III) + алюминат натрия:

$$3NaAlO_2 + FeCl_3 + 6H_2O \rightarrow 3Al(OH)_3 + Fe(OH)_3 + 3NaCl.$$

Соотношения: равные количества товарного алюмината натрия (с содержанием Al_2O_3 — 50%) и товарного хлорида железа $FeCl_3 \cdot 6H_2O$.

5.2.1.3. Другие коагулянты.

Сульфат меди:

$$CuSO_4 + Ca(HCO_3)_2 + Cu(OH)_2 + CaSO_4 + 2CO_2.$$

Доза: 5—20 г/м³ (используется в исключительных случаях).

Сульфат меди + гашеная известь:

$$CuSO_4 + Ca(OH)_2 = Cu(OH)_2 + CaSO_4.$$

Доза: 30 г $Ca(OH)_2$ на 100 г $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ (используется в исключительных случаях).

Озон не является коагулянтом, так как не оказывает действия на электрический заряд коллоидных частиц. Однако в некоторых случаях, когда вода содержит органические комплексные соединения железа или марганца, обработка озоном может вызвать коагуляцию этих соединений.

Под действием озона разрушаются комплексные соединения и освобождаемые, таким образом, ионы металла окисляются. При определенных значениях pH это может привести к образованию небольшого количества непрочного осадка. Плотность хлопьев этого осадка и способность их к слипанию недостаточны для выделения из воды путем осаждения, но этот осадок может быть удален фильтрованием.

5.2.2. КОАГУЛЯЦИОННАЯ ОБРАБОТКА ВОДЫ

5.2.2.1. Выбор коагулянта производится в лаборатории методом пробного коагулирования (см. гл. 27, с. 984). При этом важно учитывать следующие факторы: тип и качество обрабатываемой воды; изменения качества обрабатываемой воды (суточные или сезонные, особенно изменение температуры воды); требования к качеству и назначение очищенной воды; схему очистки после коагуляции (фильтрование, отстаивание); степень чистоты реагента, особенно при подготовке питьевой воды, когда нормируются побочные продукты производства реагента и вещества, попадающие с реагентом в воду.

5.2.2.2. Введение коагулянта. Так как основной целью введения коагулянта является нейтрализация коллоидных частиц загрязнений, важно распределить реагент в воде насколько возможно быстро.

Действительно, время коагуляции ничтожно мало (менее секунды), и наилучшие результаты достигаются при условии, когда коллоидные частицы полностью нейтрализованы перед тем, как часть коагулянта начнет образовывать осадок (например, в форме гидроксида металла). Иногда реагенты смешивают с водой в результате турбулентности, создаваемой при движении воды в трубе, но предпочтительнее ускорить процесс смешения, используя смесители, в которых средний градиент скорости достигает значений от 100 до 1000 $с^{-1}$.

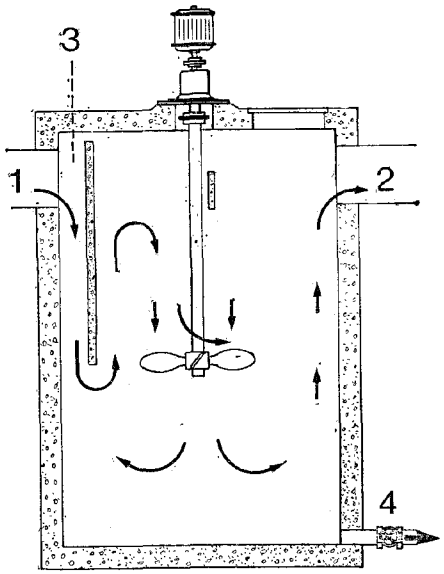


Рис. 5.1. Схема смесителя с высокоскоростной мешалкой

1 — подача воды; *2* — отвод воды; *3* — ввод реагента; *4* — опорожнение смесителя

Роль смесителя уменьшается при очистке воды в осветлителях со слоем взвешенного осадка, но применять его необходимо в случае флокуляции в свободном объеме.

Имеется несколько типов смесителей: статические и механические.

Статические смесители представляют собой устройства (винты, диафрагмы, конусы и т. д.), установленные внутри трубы, которые создают турбулентность потока, достаточную для мгновенного распределения коагулянта. Иногда эти смесители создают значительные потери напора в трубах. Они очень эффективны при номинальном расходе, но их эффективность снижается при уменьшении расхода воды в трубе.

Механические смесители представляют собой высокоскоростные мешалки — пропеллерные или лопастные (турбинные), установленные в специальной камере смесителя (рис. 5.1).

5.3. ФЛОКУЛЯЦИЯ

Образование хлопьев начинается при введении коагулянта, но объем их, массу и особенно способность к слипанию можно увеличить тремя способами:

путем контакта обрабатываемой воды с уже образовавшимся осадком при наибольшей возможной его концентрации (рециркуляции осадка, взвешенный слой осадка);

медленным и равномерным перемешиванием для повышения вероятности контакта нейтрализованных коллоидных частиц с хлопьями;

применением флокулянтов.

5.3.1. ФЛОКУЛЯНТЫ

Флокулянты используют для повышения эффективности процессов коагуляции, флокуляции или фильтрования. Они могут ускорить реакцию (флокуляцию) или улучшить качество хлопьев (их плотность, адгезионные свойства).

Флокулянты классифицируют по составу (неорганические или органические), способу получения (синтетические или природные) и электрическому заряду (анионные, катионные, неионогенные).

5.3.1.1. Активная кремнекислота была первым нашедшим применение флокулянтом. Ее используют до сих пор и она дает наилучшие результаты в сочетании с сернокислым алюминием.

Активную кремнекислоту получают частичной нейтрализацией щелочности раствора силиката натрия и обычно вводят после коагулянта.

Приготовление активной кремнекислоты в лабораторных условиях:

а) по методу Бейлиса: берут 25 мл или 35 г силиката натрия (относительная плотность 1,4; 28% SiO_2) и разбавляют до 500 мл водой. При медленном перемешивании (в течение 2 ч) осторожно добавляют 170 мл воды, содержащей 2,4 мл серной кислоты (относительная плотность 1,84). Разбавляют до 2 л. Полученный раствор содержит 0,5% SiO_2;

б) по методу Гэя: берут 25 мл или 35 г силиката натрия (относительная плотность 1,4; 28% SiO_2). Разбавляют до 400 мл водой. При перемешивании медленно добавляют 6,7 г сульфата аммония, растворенного в 100 мл воды. Медленно перемешивают в течение 2 ч, разбавляют до 1 л; полученный раствор содержит 1% SiO_2. Этот раствор более стабилен, чем полученный методом Бейлиса. Присутствие соли аммония затрудняет применение метода Гэя в схемах с первичным хлорированием воды. Оба указанных метода требуют при их использовании в производственных условиях специальных мер предосторожности;

в) силикат натрия может быть также активирован соляной кислотой, хлором, углекислотой, бикарбонатом натрия и т. д. в количествах, требуемых для нейтрализации 90% щелочности раствора силиката натрия.

Непрерывное приготовление в производственных условиях. На крупных станциях, однако, удобнее непрерывно регулировать расходы растворов силиката натрия и кислоты. Два эти раствора смешивают в резервуаре, в который может подаваться вода для получения требуемой концентрации SiO_2; затем раствор поступает для «созревания» в резервуар (полимеризатор), где он находится в течение получаса.

Для получения 1 кг в час SiO_2 требуется соблюдать приблизительно следующие соотношения: 2,5 л/ч силиката натрия (относительная плотность 1,4) и 0,24 л/ч серной кислоты (относительная плотность 1,84) или 850 г/ч бикарбоната натрия и количество воды для доведения общего раствора до 100 л/ч.

Следует регулярно проверять степень нейтрализации силиката натрия измерением общей щелочности раствора активной

кремнекислоты. Общая щелочность 1%-ного раствора SiO_2 должна быть около 10—15 мг-экв/л.

5.3.1.2. Другие неорганические флокулянты. При очистке воды с малым содержанием взвешенных веществ иногда применяют некоторые типы глин, мел или осажденный карбонат кальция, порошкообразный активный уголь (когда необходим этот вид обработки); мелкий песок, кизельгур (диатомовая земля).

5.3.1.3. Органические флокулянты. Развитие органической химии привело к разработке других более эффективных флокулянтов. Некоторые флокулянты получают из природных материалов: альгинаты (экстракты из водорослей), крахмал (экстракты из семян растений), некоторые вещества, получаемые из целлюлозы, некоторые типы смол и т. д. Альгинаты в основном применяют в качестве флокулянтов с солями железа. Иногда они дают хорошие результаты в сочетании с солями алюминия. Альгинаты получают из альгиновой кислоты, которую экстрагируют из водорослей (особенно рода Laminaria). Они нашли применение во всех странах при подготовке питьевой воды.

Другие флокулянты являются полностью синтетическими. Полиакриламиды имеют длинные цепи и высокие молярные массы [$(2—4)\cdot10^6$ г/моль], между тем полиамины обычно имеют более короткие цепи и более низкие молярные массы ($1\cdot10^6$ г/моль). Полиакриламиды используют как при очистке воды, так и при обезвоживании осадков; полиамины применяют в основном при очистке воды.

Органические флокулянты можно разделить на две группы: твердые и жидкие. Имеется большое число органических флокулянтов, среди которых следует упомянуть: престол, суперфлок, магнафлок, альгинаты, проседим, пурифлок. Выбор флокулянта, который давал бы наилучшие результаты, должен всегда производиться на основе лабораторных экспериментов. Экспериментально также следует определять разрыв во времени между введением коагулянта и флокулянта, так как этот фактор имеет очень большое значение, например, при использовании активной кремнекислоты.

Предприятия-поставщики обычно дают необходимую информацию об оптимальном применении флокулянтов. Общие сведения о них приведены в табл. 5.1.

При использовании извести для декарбонизации воды следует выбирать неионные или анионные флокулянты. С целью осветления воды могут быть использованы неионные, слабо анионные или катионные флокулянты. Если вода содержит большое количество органических веществ, а значение pH близко к нейтральному, то испытания следует начать с катионных флокулянтов.

При подготовке питьевой воды очень важно учитывать нормативные документы страны, в которой предполагается осуществить ту или иную схему очистки, так как применение органи-

ТАБЛИЦА 5.1. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ОРГАНИЧЕСКИХ ФЛОКУЛЯНТОВ

Тип вещества	Вид хранения (упаковка)	Растворение	Применение крепких растворов: приготовление	Применение крепких растворов: дозирование	Приготовление рабочего раствора	Концентрация при введении в воду, %	Время реакции в зависимости от флокулянта, с
Крахмалы, альгинаты	Мешки	Взвешивание или сухие дозаторы	Желательно применение смесителей. Концентрация крепких растворов 0,5—1%	Насосами-дозаторами	Разбавление после дозирования	0,1—0,3	30—300
Акрилаты: твердые	Мешки или бочки	То же	Применение смесителей важно. Концентрация крепких растворов 0,3—0,5% (иногда 1%)	То же		0,05—0,2	20—120
жидкие	Бочки или контейнеры	Дозирование полными бочками или насосами-дозаторами; опорожнение самотеком или сжатым воздухом (контейнеры)	Могут быть смешаны с водой при медленном перемешивании	Тихоходными насосами-дозаторами из-за высокой вязкости раствора (без разбавления или с разбавлением до 10%-ного раствора)		1	20—120
Полиамины	Бочки					1	20—120

ческих флокулянтов регламентируется специальными документами. Все страны опубликовали список разрешенных реагентов. Во Франции на 1 февраля 1978 г. отсутствует разрешение Высшего совета по здравоохранению на применение синтетических органических веществ при подготовке питьевой воды.

5.3.2. ФЛОКУЛЯЦИЯ

Эффективность флокуляции находится в прямой зависимости от предварительной коагуляции. За быстрым перемешиванием в смесителе следует медленное перемешивание в камере хлопьеобразования в течение 5 мин при очистке высококонцентрированных сточных вод и значительно дольше при подготовке питьевой воды.

Хлопьеобразование может производиться в отдельной камере хлопьеобразования или внутри осветлителя (в последнем случае для его интенсификации используются турбинные мешалки или воздействие взвешенного слоя).

Тип смесителя и камеры хлопьеобразования выбирают в зависимости от способа отделения взвеси на следующей стадии очистки. Это особенно важно учитывать, когда флокуляция производится в свободном объеме с последующим отстаиванием или флотацией.

Флокуляция происходит в резервуарах, оборудованных перемешивающими устройствами, которые вращаются относительно медленно, чтобы не вызывать разрушения уже образовавшихся хлопьев, но достаточно быстро, чтобы размер хлопьев увеличивался постепенно и предотвращалось отложение осадка на дне резервуара.

Вместимость камеры хлопьеобразования должна обеспечить продолжительность периода флокуляции, определенную лабораторными испытаниями.

Перемешивающее устройство может состоять из лопастей различной формы с вертикальной или горизонтальной осью вращения. Градиент скорости в камере хлопьеобразования рекомендуется 20—50 $с^{-1}$.

Желательно применять мешалки, работающие от электропривода, с переменной скоростью для регулирования интенсивности перемешивания в зависимости от хода процесса флокуляции.

Если необходимый объем камеры хлопьеобразования велик, желательно использовать несколько последовательных резервуаров. Каждый резервуар должен быть снабжен независимым перемешивающим устройством, скорость вращения которого при необходимости регулируется.

Наконец, важно не разрушить хлопья при подаче воды из камеры хлопьеобразования в зону отстаивания. В зависимости от требуемой степени очистки должны быть приняты следующие

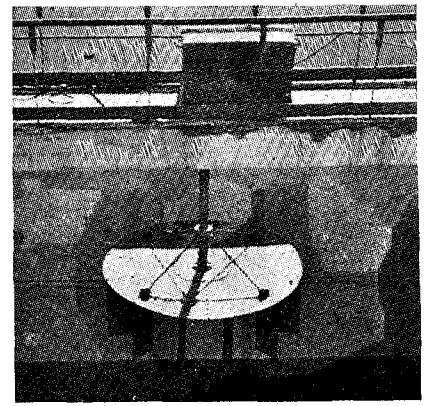


Рис. 5.2. Камера хлопьеобразования, оборудованная мешалкой с вертикальной осью

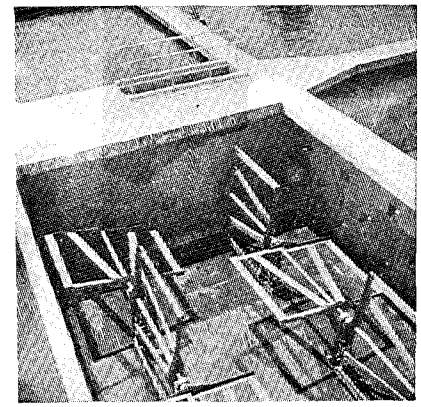


Рис. 5.3. Камера хлопьеобразования, оборудованная мешалками с горизонтальными осями

скорости потока в коммуникациях, соединяющих зону флокуляции и зону отстаивания: для легких хлопьев гидроксида металла $v = 0{,}2$ м/с; прочных $v = 0{,}5$ м/с и для хлопьев при обработке сточной воды $v = 1$ м/с.

6. ХИМИЧЕСКОЕ ОСАЖДЕНИЕ

6.1. ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ОСАЖДЕНИЯ

Химическое осаждение — процесс, при котором под воздействием соответствующих реагентов образуются нерастворимые соединения. Реакции, проходящие при этом, подчиняются закону Бертолле или законам окисления-восстановления.

При обработке воды, наиболее часто прибегают к осаждению ионов Ca^{2+} и Mg^{2+}, а также гидроксидов металлов.

6.1.1. ВЫДЕЛЕНИЕ КАЛЬЦИЯ И МАГНИЯ

6.1.1.1. Основные методы.

Удаление карбонатов путем добавления извести. Декарбонизация воды известью — широко применяемый способ химического осаждения, что приводит к снижению бикарбонатной жесткости воды (называемой также временной жесткостью, см. с. 928).

При анализе воды жесткость выражается общей жесткостью $Ж_{общ}$, мг-экв/л, определяемой суммой катионов Ca^{2+} и Mg^{2+}, между тем содержание бикарбонатов характеризует общую щелочность $ОЩ$, мг-экв/л. Некарбонатная жесткость, следовательно, выражается как $Ж_{общ} - ОЩ$.

Таким образом, удаление карбонатов известью есть частичное уменьшение содержания суммы ионов кальция и магния, не затрагивающее постоянной жесткости.

Основные химические реакции удаления карбонатов представлены следующим образом:

$$Ca(OH)_2 + Ca(HCO_3)_2 \rightarrow 2CaCO_3 + 2H_2O;$$
$$Ca(OH)_2 + Mg(HCO_3)_2 \rightarrow MgCO_3CaCO_3 + 2H_2O.$$

Так как карбонат магния — относительно растворимое соединение (растворимость около 70 мг/л), то избыток извести обеспечивает реакцию:

$$Ca(OH)_2 + MgCO_3 \rightarrow \underset{\downarrow}{CaCO_3} + \underset{\downarrow}{Mg(OH)_2}.$$

Если дозы реагентов определены точно, щелочность воды снизится в соответствии с теоретической растворимостью системы $CaCO_3 + Mg(OH)_2$, составляющей 0,4—0,6 мг-экв/л, при обычных концентрации и температуре. Эти предельные значения могут однако возрасти при наличии в воде органических веществ. Если исходная вода содержит также бикарбонат натрия $ОЩ > Ж_{общ}$, то в воде останется дополнительная щелочность в виде карбоната натрия или каустической соды в количестве, соответствующем $ОЩ - Ж_{общ}$.

Чтобы оценить достоинства различных способов удаления карбонатов с использованием извести, необходимо знать механизмы осаждения карбонатов кальция и магния.

При добавлении извести в сырую воду реакции проходят очень медленно, если отсутствуют центры кристаллизации. В состоянии покоя требуется несколько суток, чтобы наступило химическое равновесие. В условиях проточного отстойника, когда нет контакта с содержащимся в нем осадком (такие конструкции еще применяются, но считаются устаревшими), длительность реакции составляет несколько часов. С другой стороны, если вода и известь контактируют с достаточно большим объемом уже образовавшихся кристаллов $CaCO_3$, то реакция достигает точки равновесия за несколько минут. Так как осаждение проходит на кристаллах, размер их возрастает, скорость седиментации по закону Стокса увеличивается, что позволяет уменьшить размеры сооружения.

Все сказанное справедливо в том случае, когда поверхность кристаллов $CaCO_3$ остается достаточно чистой. Поэтому если в воде присутствуют органические коллоиды, способные помешать кристаллизации, то их следует выделить из воды; обычно для этого добавляют в сырую воду коагулянты: хлорид железа, сульфат или полихлорид алюминия.

Очень важно учитывать, что $CaCO_3$ в отдельности имеет тенденцию образовывать твердые крупные скопления кристаллов, которые оседают чрезвычайно быстро, в то время как магний в отдельности образует очень легкие хлопья $Mg(OH)_2$. Если доля этого вещества ничтожно мала, оно сорбируется кальциевым осадком. Если же она велика, то невозможно получить тяжелый осадок и желаемую скорость осаждения.

Сооружение для удаления карбонатов выбирают поэтому прежде всего по его способности обеспечивать образование гомогенной смеси сырой воды, реагентов и осадка $CaCO_3$ в зоне реакции соответствующих размеров. Площадь поверхности зоны осаждения или осветления зависит от условий образования осадка и, главным образом, от содержания органических коллоидных веществ и солей магния.

Если требуется тщательная очистка от карбонатов, то после осаждения их воду следует подвергнуть фильтрованию.

Использование карбоната натрия. Применявшийся прежде способ снижения постоянной жесткости с карбонатом натрия при высокой температуре, с карбонатом бария или тринатрийфосфатом теперь, в сущности, устарел и заменен более современным, изложенным ниже. Процесс удаления солей постоянной жесткости с карбонатом натрия на холоду еще используется и сейчас; он основан на осаждении бикарбонатов кальция и магния. Проходят следующие реакции:

$$CaSO_4 + Na_2CO_3 \rightarrow Na_2SO_4 + \underset{\downarrow}{CaCO_3}; \quad (1)$$

$$CaCl_2 + Na_2CO_3 \rightarrow 2NaCl + \underset{\downarrow}{CaCO_3}. \quad (2)$$

Этот метод имеет ряд недостатков, в частности общая жесткость не может быть снижена более чем до 0,6—0,8 мг·экв/л.

При удалении карбонатов предпочтение часто отдается использованию одной извести, а также умягчению на натрий-катионитовых фильтрах, при котором до умягчения (после осветления) необходимо предусмотреть фильтрование через песок.

Осаждение каустической содой. Осаждение ионов кальция и магния каустической содой представляет собой комбинацию процессов обработки известью и карбонатом натрия, описанных выше.

Основная реакция:

$$Ca(HCO_3)_2 + 2NaOH \rightarrow \underset{\downarrow}{CaCO_3} + Na_2CO_3 + 2H_2O. \quad (3)$$

Осаждение карбоната кальция сопровождается образованием карбоната натрия, который в свою очередь вступит в реакции (1) и (2) (снижение постоянной жесткости).

Таким образом, снижение жесткости с помощью каустической соды равно удвоенной концентрации бикарбонатов щелочно-земельных металлов в исходной воде.

Значение ОЩ воды может быть понижено до 0,6 мг-экв/л, если достаточное количество ионов кальция соединится с образующимся карбонатом натрия.

6.1.1.2. Основные данные для расчета и контроля осаждения.

Подсчеты дозы извести.

Обозначения:
$Ж_{общ}$ — общая жесткость воды;
$ОЩ$ — общая щелочность исходной воды (измеряется в присутствии метилоранжа);
$Ж_{Ca}$ — кальциевая жесткость, соответствующая общему содержанию солей кальция;
$Ж_{Mg}$ — магниевая жесткость, соответствующая общему содержанию солей магния;
C — содержание свободного диоксида углерода в воде, в мг-экв/л, подсчитанное как

$$\frac{\text{свободный } CO_2, \text{ мг/л}}{22};$$

$Щ_{ф}$ — щелочность по фенолфталеину.

С учетом обозначений теоретически требуемая доза извести для оптимального осаждения карбоната кальция составит:

$$CaO : 28 \times (ОЩ + C) \text{ г/м}^3$$

или

$$Ca(OH)_2 : 37 \times (ОЩ + C) \text{ г/м}^3.$$

Измерение показателей описано на с. 941 и далее.

Контроль результатов.

а) В исходной воде: значение $(Ж_{общ} - ОЩ) > 0$.

Если осаждают только карбонат кальция, в идеальных условиях должно соблюдаться соотношение $Щ_{ф} = \frac{ОЩ}{2} \pm 0{,}1$ мг-экв/л при минимальном значении $ОЩ$ примерно 0,4 мг-экв/л, если вода не содержит магния.

Если $Ж_{Mg} > (Ж_{общ} - ОЩ)$ применение этого соотношения даст избыточное значение $ОЩ$ вследствие растворимости карбоната магния. В этом случае может быть использован другой метод подсчета на основании выражения $(2\,ОЩ - Ж_{Ca} + C)$, оптимальный результат получится, если $Щ_{ф} = \frac{ОЩ}{2} + 0{,}1 - 0{,}2$ мг-экв/л с наименьшим возможным значением $Щ_{ф}$.

б) $Ж_{общ} - ОЩ < 0$.

Это условие применимо к воде, содержащей бикарбонат натрия. Удовлетворительное осаждение кальция и магния всегда достижимо, если доза извести подсчитывается, исходя из суммы $ОЩ + Ж_{Mg} + C$, но при этом вода будет содержать карбонат натрия и каустическую соду и может оказаться желательным снижение дозы извести.

В других случаях доза извести должна быть увеличена (или уменьшена) на 28 г/м³ (в расчете на CaO) или на 37 г/м³ в расчете на $Ca(OH)_2$ на каждый мг·экв $Щ_{ф}$, оказавшийся выше или ниже теоретического значения.

Значения 28 и 37 даны в расчете на 100%-ный чистый продукт. На практике известь всегда имеет загрязнения и большее или меньшее количество карбонатов, поэтому действительные значения должны быть увеличены соответственно приблизительно до 39 и 48.

Расчет дозы карбоната натрия. Требуемую дозу карбоната натрия (на чистый продукт) определяют равной 53 $(Ж_{общ} - ОЩ)$ г/м³.

Проверка результатов: теоретически для воды, не содержащей магния, справедливо: $Ж_{общ} = ОЩ = 2\,Щ_{ф}$. Практически не для воды, часть постоянной жесткости которой обусловлена магнием, это правило уже несправедливо и каждый случай должен быть рассмотрен отдельно.

Расчет дозы каустической соды. Требуемая доза каустической соды в расчете на мг-экв/л $ОЩ$ (на чистый продукт) составляет 40 $(2\,ОЩ - Ж_{Ca} + C)$ г/м³.

Контроль результатов: чтобы снизить $ОЩ$ на 1 мг-экв/л, $Ж_{общ}$ следует уменьшить на 2 мг-экв/л.

Практически дозу каустической соды, вводимую в воду, контролируют заданным остаточным значением $ОЩ$. Это исключает ненужный перерасход соды, приводящий к избыточному образованию карбоната натрия или магния в воде.

6.1.2. УДАЛЕНИЕ КРЕМНИЯ

Процесс обескремнивания в большей степени относится к адсорбционным процессам, нежели к процессам осаждения. Однако поскольку его часто осуществляют одновременно с декарбонизацией, целесообразно рассмотрение этого вопроса в настоящей главе. Процесс может быть проведен при нагревании или на холоду.

6.1.2.1. Удаление кремния с алюминатом натрия. В природных водах содержание кремния может быть существенно уменьшено путем перевода его в состав комплексов алюмосиликатов кальция или железа, которые образуются при температуре исходной воды. Для этой цели к воде добавляют соответствующие дозы хлорида железа, алюмината натрия и извести.

Наиболее полное удаление кремния обычно достигается, если вода одновременно подвергается декарбонизации. Осадок в этом случае содержит карбонат кальция, а также комплексные соединения, в состав которых входят кремний, алюминий и железо. Чем выше концентрация кремния в исходной воде и выше температура, тем больше концентрация остаточного кремния.

Обычно можно снизить содержание кремния до 2—5 мг/л (в расчете на кремнезем), если его начальная концентрация составляет 20 мг/л при 20 °С. При более высоких начальных концентрациях снижение содержания кремния составляет от 70 до 80%.

6.1.2.2. Удаление кремния магнезией. Обработка может быть проведена при нагревании или на холоду.

Процесс на холоду: получаемые результаты аналогичны результатам процессов обескремнивания описанным выше. Маг-

незия готовится на месте из оксида магния, который растворяется при продувке CO_2 и затем осаждается с известью.

Процесс при нагревании: совмещает процесс удаления из воды кремния и декарбонизацию ее.

Если вода обрабатывается при температуре около 100 °С в смеси с известью и пористым порошкообразным ангидридом магния, то кремнезем может быть удален адсорбцией (при этом остаточное содержание его в обработанной воде ниже 1мг/л). Этот метод, с последующим катионообменным умягчением, широко используется для воды, питающей бойлеры среднего давления. Необходимо включать фильтрование осветленной воды через среду, которая не содержит кремний (например, мрамор или антрацит).

6.1.3. УДАЛЕНИЕ СОЛЕЙ ИЗ МЕТАЛЛСОДЕРЖАЩИХ СТОКОВ ПУТЕМ ОБРАБОТКИ ОСАЖДЕНИЕМ

Различные неорганические соли, содержащиеся в стоках производств обработки металлов, удаляют путем осаждения, описываемым законом Бертолле. Среди этих солей основные — фториды и фосфаты.

Ион фтора после обработки воды известью превращается в нерастворимый фторид кальция, который затем осаждается в соответствии с его пределом растворимости; последний в свою очередь колеблется от 15 до 25 мг/л (в расчете на F) в зависимости от природы и концентрации других присутствующих в воде солей.

Фосфаты осаждают солями кальция или железа в форме фосфатов кальция или железа.

Осаждение сульфата кальция в форме гипса ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) при нейтрализации растворов известью, достаточно концентрированных по серной кислоте, относится к этому же типу обработки. Здесь реакции ускоряются также в присутствии ранее образовавшихся кристаллов, что приводит к получению большого объема осадков.

6.1.4. ОБРАБОТКА РАССОЛОВ

Прежде чем рассол подвергнуть выпариванию для образования кристаллов соли или же электролизу для выделения хлора, его очищают путем химического осаждения. В первом случае это необходимо сделать, чтобы получить максимально возможную чистую соль для использования ее человеком. Во втором случае задача может изменяться в зависимости от типа используемого электролизного оборудования.

Если ячейки электролизера диафрагменного типа, где диафрагма отделяет анод от катода для предотвращения рекомбинации хлора и натрия, обеспечивающих прохождение электрического тока, то кальций и магний должны быть выделены, чтобы исключить их осаждение на диафрагме и предотвратить ее загрязнение. В ячейках с ртутными катодами, в которых натрий находится в составе амальгамы, очистка должна быть особенно полной, чтобы удалить, в частности, ионы железа и магния, которые могут вытеснить натрий из амальгамы. В обоих случаях износ графитовых анодов уменьшается, если удалены сульфат-ионы.

Основным фактором, позволяющим отличить сырой рассол от обычной воды, служит концентрация растворенных ионов, которая в первом случае в 10—10 000 раз больше, чем во втором. Вследствие этого происходит неполная диссоциация ионов, а кинетика реакций осаждения отличается от той кинетики, которая описывает процессы обработки воды.

В рассоле, пропущенном через электролитическую батарею, понижается концентрация NaCl, но в то же время увеличивается его загрязнение другими солями, присутствовавшими в обрабатываемых рассолах; эти примеси следует выводить до того, как рассол будет подан в электролитическую батарею.

Выделение ионов кальция и магния. Кальций и магний присутствуют в формах сульфатов и хлоридов.

Магний осаждается известью в виде гидроксида магния по реакции:

$$Ca(OH)_2 + Mg^{2+}(SO_4,Cl_2) \rightarrow \underset{\downarrow}{Mg(OH)_2} + Ca^{2+}(SO_4,Cl_2).$$

Ионы Mg^{2+} замещаются ионами Ca^{2+}, которые остаются в растворе. Весь кальций затем осаждается карбонатом натрия в виде карбоната кальция. Если использовать избыток карбоната натрия (от 0,5 до 1 г/л), то остаточная концентрация кальция составит от 2 до 5 мг/л.

Выделение сульфат-ионов. Сульфат-ионы в рассолах связаны с ионами кальция, натрия, магния. Как показано выше, сульфат магния превращается в сульфат кальция в процессе выделения ионов магния.

Растворимость сульфата кальция в рассоле (в пределах нескольких граммов на литр) зависит от концентрации рассола: увеличивается с ростом температуры до 40 °С, а затем быстро падает при росте температуры от 50 до 120 °С.

При введении в рассол ионов Ca^{2+} в виде $CaCl_2$ или $Ca(OH)_2$ сульфаты осаждаются в форме сульфата кальция при остаточной концентрации SO_4^{2-} от 3 до 4 г/л.

Возможные две схемы обработки в зависимости от того, требуется или нет удаление сульфатов вместе с кальцием и магнием. Если сульфаты удалять не требуется, то известь и карбонат натрия вводят последовательно, но в два реактора, через которые проходит рассол, прежде чем он поступит в отстойник:

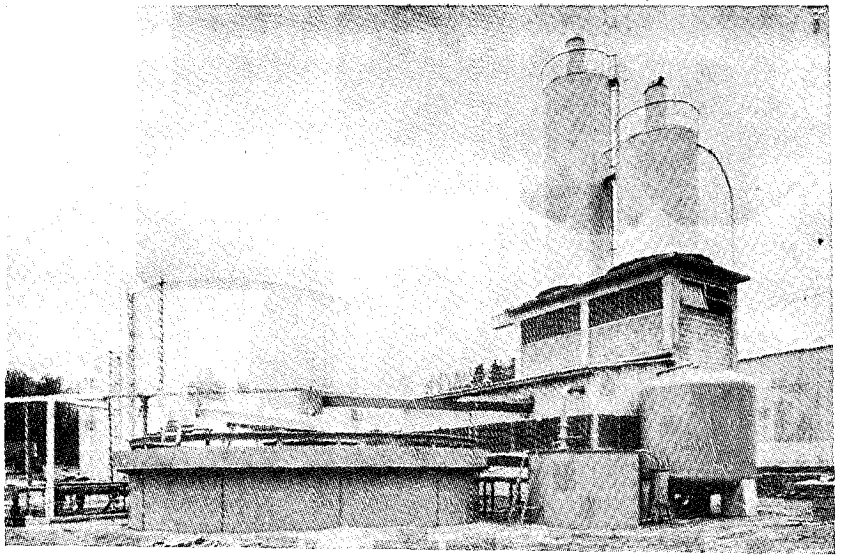


Рис. 6.1. Переработка рассола. Производство соли. Варанджевиль, Франция

предпочтительнее использовать отстойник с рециркуляцией осадка с восходящей скоростью от 0,75 до 2 м/ч в зависимости от того, присутствует ли в рассоле магний. Если же сульфаты необходимо удалять, то их удаляют прежде чем будут извлечены ионы кальция, поскольку последние вводят для выведения сульфатов.

Таким образом, система включает реактор с рециркуляцией осадка, в котором поддерживается высокая концентрация осадка (200—300 г/л), где ионы Mg^{2+} осаждаются известью и ионы SO_4^{2-} — хлоридом кальция. За этим реактором расположен отстойник с рециркуляцией, в котором осаждается введенный Ca^{2+}; окончательное осветление происходит в отстойнике со скребками.

6.1.5. ОСАЖДЕНИЕ ГИДРОКСИДОВ МЕТАЛЛОВ

Основное требование в процессе осаждения гидроксидов металлов — выделение тяжелых металлов: кадмия, меди, хрома, никеля, цинка и железа, которые присутствуют, в частности, в стоках цехов обработки металлов (с. 876). Если предположить, что эти металлы присутствуют в виде ионов и не образуют комплексов, то все они осаждаются в виде гидроксидов или гидрокарбонатов в определенном интервале значений pH. Так, если pH среды колеблется в пределах 8,5—9,5, то растворимость этих металлов находится на уровне допустимой.

6.2. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОСАЖДЕНИЯ

6.2.1. ОСАЖДЕНИЕ КАЛЬЦИЯ И МАГНИЯ НА ХОЛОДУ

Для ускорения процессов химического осаждения реакции должны проходить в присутствии ранее образованных масс кристаллов. Оборудование, используемое для удаления карбонатов, независимо от того, преследуется ли одновременно цель уменьшить постоянную жесткость, включает либо приспособление для контакта с осадком, либо реактор для контакта с гранулами.

6.2.1.1. Сооружения с рециркуляцией осадка. Для осаждения кальция и магния идеально подходят комбинированные сооружения, включающие зону реакции (см. гл. 7). К ним относятся циркуляторы, акселаторы, турбоциркуляторы и полочные осветлители типа RPS. Заданная высокая концентрация в камере реакции поддерживается в сооружениях всех типов; удаление карбонатов практически полное.

Циркулятор и турбоциркулятор пригодны, в частности, и для осаждения ионов фтора и фосфора. Их используют также для обработки рассолов в качестве реакторов либо реакторов — осветлителей.

Очень высокая концентрация осадка может быть получена в сооружениях с механическими скребками.

6.2.1.2. Сооружения со взвешенным слоем осадка — это преимущественно пульсаторы, которые наиболее пригодны в тех случаях, когда скорости оседания очень малы, например при осаждении гипса из пересыщенного раствора сульфата кальция. Такие сооружения позволяют получить результат, очень близкий к пределу растворимости вещества.

6.2.1.3. Сооружения, обеспечивающие контакт с гранулами, отличаются от предыдущей группы главным образом тем, что в них используются центры кристаллизации крупных размеров. В сооружениях со взвешенным слоем осадка размеры элементарных кристаллов карбоната кальция составляют 0,01 мм, а здесь используется «каталитическая» масса, обычно состоящая из зерен песка с начальным размером от 0,2 до 0,4 мм, находящаяся в конической части. Карбонат кальция осаждается на поверхности песчинок, между которыми вода проходит по направлению вверх с большой скоростью; за это время заканчивается реакция и обеспечивается хорошее осаждение осадка.

Эти сооружения имеют три преимущества: небольшой размер; возможность эксплуатации под давлением (если их объединить с закрытыми фильтрами, могут быть использованы для удаления карбонатов из воды без понижения давления до атмосферного); возможность получать вместо обычного осадка крупинки диаметром 1—2 мм, которые быстро высушиваются. Однако эти сооружения не могут быть использованы для воды, со-

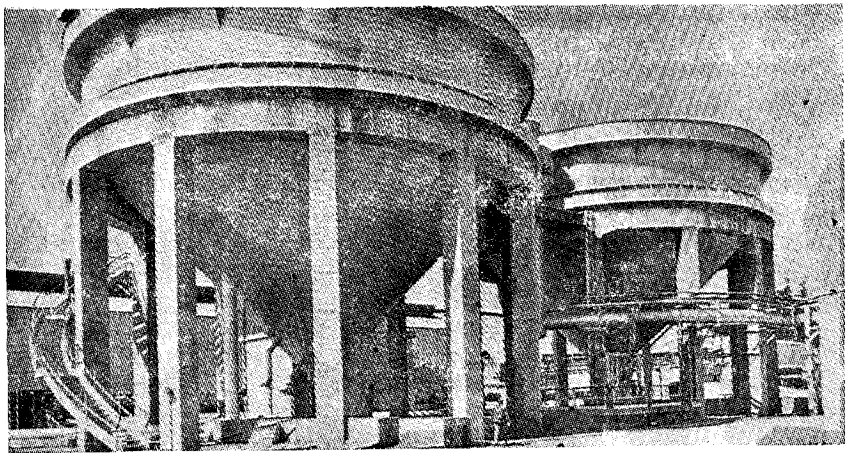


Рис. 6.2. Осветлитель типа циркулятор

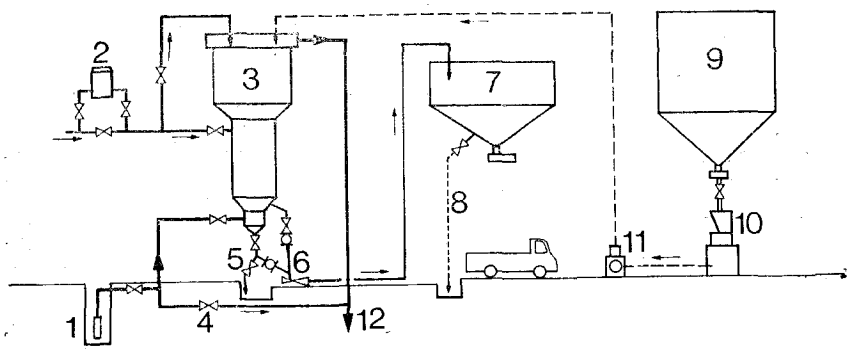


Рис. 6.3. Схема потоков в осадителе «Гиразер»

1 — подъем сырой воды; *2* — контейнер с песком; *3* — гиразер; *4* — байпасс; *5* — опорожнение гиразера; *6* — эжектор; *7* — накопительная емкость для гранул; *8* — выгрузка гранул; *9* — накопительная емкость для извести; *10* — питатель; *11* — дозирующий насос; *12* — выпуск обработанной воды

держащей избыточное количество коллоидных веществ или же большое количество магния, который будет осаждаться в виде гидроксида магния (при $Ж_{Mg} > Ж_{общ} - ОЩ$), поскольку он не кристаллизуется совместно с карбонатом кальция.

Осадитель «Гиразер» (рис. 6.3) состоит из трех поставленных друг на друга цилиндров увеличивающегося диаметра, соединенных между собой усеченными конусами. При такой конфигурации объем каталитической массы может быть практически удвоен по сравнению с объемом, который соответствует обычному конусу той же высоты и того же диаметра в его верхней части. Сырая вода подается с большой скоростью в нижний цилиндр через ответвление трубы, которое придает воде спиральное направление движения. Известь вводят в виде известкового молока в центр этой трубы, что обеспечивает быстрое смешивание ее с сырой водой.

Так как гранулы непрерывно увеличиваются в размере и поддерживать их во взвешенном состоянии становится невозможным, их периодически выгружают и заменяют более мелкими зернами. Поскольку гиразер имеет большой объем активных зерен, он работает с большой скоростью (50—70 м/ч).

«Гиразер» может быть использован также для умягчения с каустической содой.

6.2.2. «ТЕРМОЦИРКУЛЯТОР» ДЛЯ УДАЛЕНИЯ КАРБОНАТОВ И КРЕМНИЯ ПРИ НАГРЕВАНИИ

Это оборудование используют для удаления карбонатов только известью, с одновременным обескремниванием магнезией с целью получения воды для бойлерных установок среднего давления. Его можно использовать также для химического осаждения при нагревании, сопровождающегося дегазацией.

Этот аппарат эксплуатируют при низком давлении, соответствующем давлению паров при температуре между 102 и 115 °С. Такая температура создает условия для быстрого и полного протекания реакции, которая еще ускоряется рециркуляцией осадка. Циркуляция обеспечивается введением эмульсии пара извне, получаемой с помощью устройства, работа которого легко контролируется. Исходная вода поступает через трубопровод *1* и разбрызгивается распылительной насадкой *2* в пар, который занимает нижнюю часть аппарата. Она немедленно нагревается и попадает в большую воронку *4*, где соприкасается с реагентами, введенными через трубопровод *3* и рециркулирующим осадком, поступившим с помощью парового эжектора *12* через трубу *10*.

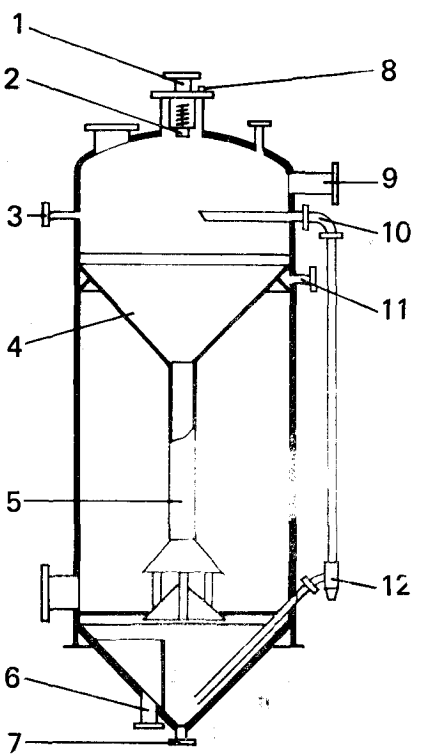


Рис. 6.4. Термоциркулятор

Вода затем движется в нижнюю отстойную зону через центральный трубопровод *5*,

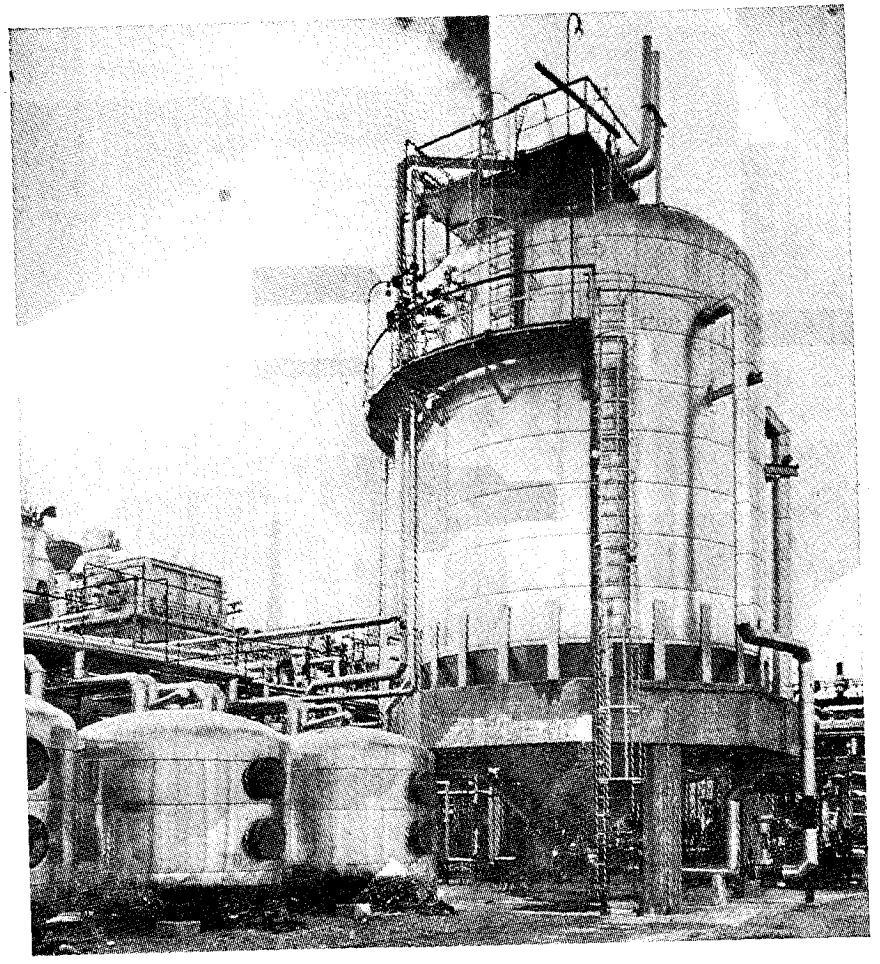


Рис. 6.5. Удаление карбонатов горячим процессом в термоциркуляторе диаметром 7,5 м (производительность 240 м³/ч). Станция очистки Кельстербах, ФРГ

достигает отстойной зоны, откуда осадок удаляется, а верхний слой сконденсированной воды передается на фильтр через трубы *11*. Неконденсируемые газы выводятся через короткий отрезок трубы *8*.

Вспомогательное оборудование включает естественно регуляторы пара и уровня воды.

Горячий пар выводится через трубу *9*.

Отстоявшийся осадок собирается в нижней конической части, откуда он забирается для рециркуляции, а избыток осадка выводится в концентратор *6*, из которого затем также удаляется *7*.

Это оборудование может включать зону дегазации, занятую водой, собирающейся в верхней части. В этом случае пар для нагревания пропускается через дегазационную камеру прежде, чем он будет нагревать исходную воду.

7. ОТСТАИВАНИЕ. ФЛОТАЦИЯ

Физические законы, которым подчиняются процессы отделения твердых частиц от жидкости, рассмотрены в гл. 3 (с. 69), а в данной главе — характеристики отстойников и флотаторов, в которых протекают эти процессы.

7.1. ОСНОВНЫЕ ВИДЫ ОТСТАИВАНИЯ

Частицы, находящиеся во взвешенном состоянии в воде, в процессе отстаивания и осветления оседают на дно сооружения. При этом выпадают в осадок те из них, которые находятся в сыром стоке и которые образуются вследствие применения химических реагентов, добавляемых искусственно (коагуляция, удаление железа, химическая очистка), или в результате физической флокуляции, связанной с биологической очисткой городских сточных вод.

7.1.1. СТАТИЧЕСКОЕ ОТСТАИВАНИЕ

Этот вид отстаивания представляет собой периодический процесс, когда вода остается в сооружении в состоянии покоя в течение нескольких часов, после чего ее спускают до уровня верхней границы слоя выпавшего осадка. Этот способ отстаивания применяют на временных сооружениях, но в промышленном масштабе всегда отдают предпочтение отстаиванию при непрерывном поступлении жидкости, так как при этом не требуется постоянное ручное управление.

Отстойники и осветлители бывают прямоугольной или круглой формы в плане. Чтобы обеспечить выпадение осадка, восходящая скорость воды в отстойнике должна быть меньше скорости падения частиц. Обычно это зависит от плотности и размеров частиц.

Скорости осветления могут быть определены согласно методу № 704, описанному на с. 985.

В небольших отстойниках стенки днища расположены под углом 45—60°, что позволяет непрерывно или периодически удалять осадок с самой нижней отметки сооружения. В больших отстойниках с целью ограничения их высоты угол наклона стенок днища принимают минимальным, осадок с помощью скреб-

кового механизма собирается в приямок, откуда легко удаляется.

Для осадка, получаемого при первичном отстаивании в процессе обработки городских сточных вод, уклон стенок днища должен быть больше, чем при обработке питьевых вод, а потому целесообразнее использовать отстойники со скребковым механизмом.

Желательна регулярная эксплуатация статических отстойников. Колебания расхода воды вызывают вихревые потоки, которые поднимают осадок к поверхности. Кроме того, разность температур сточной воды, поступающей в отстойник и находящейся в нем, даже не столь значительная, все же создает конвективные течения, которые также поднимают осадок к поверхности. Необходимо также тщательно продумать распределение поступающей воды и отвод осветленной, чтобы исключить возможность возникновения каких-либо местных течений и обеспечить равномерное распределение поступающей воды по всей зоне отстаивания при условии сохранения нейтральной зоны для аккумуляции осадка.

При изучении распределения потоков, формирующихся в отстойнике, поступающую в сооружение воду подкрашивают. Краситель не должен быстро диффундировать в воде, поэтому рекомендуется использовать родамин *В* (в концентрации 1 г/л). Одного литра такого раствора достаточно для обследования осветлителя объемом 60 м³.

При коагуляционной обработке воды химическими реагентами перед осветлителем необходимо предусмотреть флокулятор, рассчитанный на «диффузное осаждение», при котором концентрация взвешенных веществ определяется как сумма взвешенных веществ сырой сточной воды и введенных реагентов.

Применение отстаивания в тонком слое. В статическом отстойнике максимальная восходящая скорость потока не зависит от глубины отстойника. Это позволило оборудовать существующие отстойники полочными блоками, каждый из которых представляет собой отстойник с ограниченной глубиной. При этой глубине может быть увеличена нагрузка на единицу площади отстойника (см. гл. 3, с. 79).

7.1.2. ОСВЕТЛЕНИЕ В УСЛОВИЯХ КОНТАКТА С ОСАДКОМ

Флокуляция может быть улучшена в результате увеличения концентрации хлопьев или введения рециркуляции осадка, значительно ускоряющей осветление.

В биологической очистке сточных вод резервуары, в которых происходит отделение очищенной воды от активного ила, называются вторичными отстойниками. Они должны обеспечить наибольшую скорость рециркуляции или с тем, чтобы ил оставался в сооружении как можно меньший период времени перед

возвращением в аэротенк. Во вторичных отстойниках для удаления ила применяют скребковые устройства, которые все чаще уступают место илососам или комбинациям этих устройств.

При очистке питьевых вод и в промышленном водоснабжении процессы флокуляции и осветления могут быть совмещены в одном сооружении: в «Циркуляторе» с циркуляцией осадка или «Пульсаторе» — осветлителе со взвешенным слоем, содержащим высокую концентрацию взвешенных веществ. В этих сооружениях полностью процесс осветления завершается в результате контакта воды и плотного осадка. Скорость движения потока воды вверх может быть увеличена до 1,5—6 м/ч в зависимости от типа осветлителя. Таким образом может быть получена осветленная вода хорошего и постоянного качества независимо от степени мутности исходной воды и характера обработки.

Уплотнение избыточного осадка происходит в специальной камере или иловом приямке, откуда он удаляется автоматически.

При образовании большого количества осадка необходимо использовать отстойник с камерой флокуляции и скребковым механизмом.

В системах отстаивания, в которых осветление происходит во взвешенном слое, улучшается хлопьеобразование и эффективнее используются добавляемые в воду реагенты, вследствие повышения концентрации в пределах взвешенного слоя осадка. При этом ускоряется адсорбция растворенных веществ на хлопьях ила. При очистке воды с добавлением активного порошкообразного угля во взвешенный слой осадка можно добиться тех же результатов, но при этом значительно снизить дозу угля. Экономия активного угля может превышать 40%.

7.1.3. ПРИМЕНЕНИЕ ТОНКОСЛОЙНОГО ОТСТАИВАНИЯ В ОСВЕТЛИТЕЛЯХ СО ВЗВЕШЕННЫМ СЛОЕМ ОСАДКА

В осветлителях с рециркуляцией осадка («Циркуляторах» и «Акселаторах») или со взвешенным слоем осадка (в «Пульсаторах») применение полочных блоков позволяет улучшить качество осветленной воды при той же восходящей скорости, вследствие улавливания частиц осадка, выносимых из взвешенного слоя. И наоборот, при одинаковом качестве осветленной воды использование этого оборудования дает возможность значительно увеличить пропускную способность сооружения.

Если в слое взвешенного осадка установить блоки с наклонными полками, то процесс осаждения ускоряется. Ил осаждается на нижнюю полку и сползает вниз в зону накопления осадка. В то же самое время вода без взвеси собирается под верхней полкой и быстро движется вверх. Это явление можно наблюдать в лабораторных условиях, если отстаиваемый осадок по-

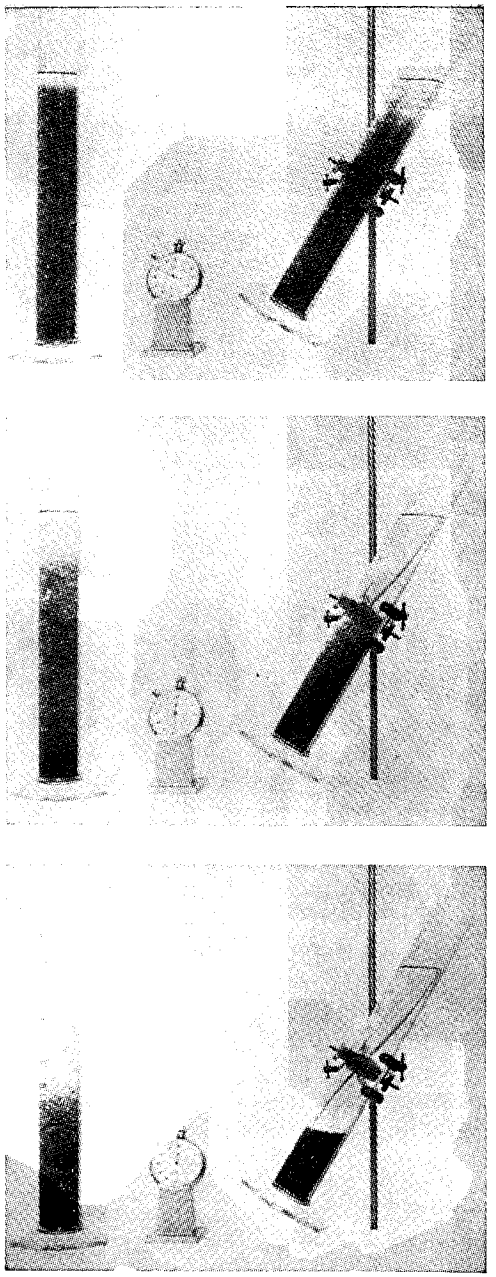


Рис. 7.1. Отстаивание осадка в вертикальных и наклонных мерных цилиндрах за 5, 10 и 15 мин

местить в два мерных цилиндра (рис. 7.1.). В левом цилиндре *1*, расположенном вертикально, происходит обычное осаждение слоя взвешенного осадка. В правом цилиндре *2*, расположенном под углом 60° к горизонтальной плоскости, осветление воды происходит в результате оседания слоя взвешенного осадка и отстаивания в трубчатых элементах, расположенных в этом слое, что вызывает значительное увеличение скорости отстаивания (рис. 7.2). Из графика видно, что осадок в вертикальном цилиндре будет занимать объем 125 мл через 6 мин с начала отстаивания, а в цилиндре, расположенном наклонно, через 2,5 мин. Как показал опыт, осветление воды достигается в результате одновременного оседания слоя взвешенного осадка и отстаивания в тонком слое воды. При этом скорость осаждения может быть очень высокая (20 м/ч); она зависит от природы воды и типа взвешенных веществ.

7.1.4. СВЕРХУСКОРЕННОЕ ОСВЕТЛЕНИЕ

Совмещение процессов отстаивания в контакте с осадком и в тонком слое при введении наклонных полочных блоков во взвешенный слой

осадка («Суперпульсатор») позволяет увеличить скорость отстаивания в 2—3 раза по сравнению с обычным ускоренным отстаиванием в контакте с осадком.

Конвективные течения: любой процесс осветления может быть серьезно нарушен, если плотность воды не остается постоянной, что вызывается изменением температуры воды и степени ее минерализации. При изменении температуры воды, поступающей в отстойник, на 1 °С в час может быть значительно уменьшена производительность осветлителя. Изменение минерализации воды на 1 г/л в час дает тот же эффект.

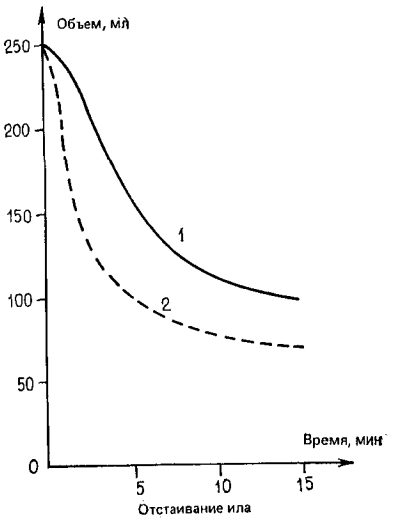


Рис. 7.2.

7.2. ОТСТОЙНИКИ

Если отстаивание воды происходит в динамических условиях при непрерывном разделении твердой и жидкой фаз и непрерывном движении воды в отстойнике, то проектирование сооружения не может быть основано только на восходящей скорости потока. Необходимо учитывать такие параметры, как отношение высоты к диаметру, числа Рейнольдса и Фруда, согласованные для различных точек отстойника, чтобы гарантировать наименьшую турбулентность и однородность потока и гашение энергии, поступающей и распределяемой по отстойнику воды. Распределение воды должно быть равномерным, без турбулентных потоков и нарушения процесса отстаивания, с обеспечением однородности потока в этой зоне. Особое внимание следует уделять системам сбора осветленной воды, обеспечивающим однородность потока во всем сооружении.

Не меньшее значение при проектировании отстойников имеют и такие характеристики, как объем и концентрация образующегося осадка, а также способ его удаления.

Следовательно, отстойник нельзя рассматривать как простой бункер, потому что это сооружение представляет собой сложный комплекс различного оборудования, эффективность работы которого определяется его гидравлическими характеристиками, которые поэтому должны быть очень тщательно подобраны.

7.2.1. СТАТИЧЕСКИЕ ОТСТОЙНИКИ

Стало привычным использовать термин «статические» для отстойников, в которых не предусмотрены ни рециркуляция ила, ни слой взвешенного осадка, хотя отстаивание в них представляет собой динамический процесс. В зависимости от количества взвешенных веществ, объема удаляемого осадка и наклона стенок днища сооружения сбор осадка осуществляется с помощью системы скребков или без них.

7.2.1.1. Статические отстойники без скребковых систем. Применяют обычные вертикальные отстойники с конусообразным днищем, горизонтальные и тонкослойные статические.

Обычные вертикальные отстойники с конусообразным днищем используют при небольших расходах воды (около 20 м³/ч) для химической очистки воды, а также для очистки сточных вод, поступающих от населенных пунктов с числом жителей не превышающим 1000—2000. Такие отстойники могут быть использованы в больших установках, но при условии, что количество осадка незначительно и его плотность высокая. Перед отстаиванием вода должна быть обработана во флокуляторе и, если необходимо, в песколовке.

Наклон стенок конической части сооружения должен быть от 45 до 60° в зависимости от вида очищаемой воды и используемого способа очистки. Средняя восходящая скорость потока принимается от 0,5 до 1 м/ч для осветления питьевой воды и от 1 до 2 м/ч для первичного отстаивания бытовой сточной воды.

Горизонтальные отстойники раньше применялись для питьевого водоснабжения. Площадь поверхности отстаивания, выраженная в квадратных метрах, должна быть рассчитана, исходя из величины гидравлической нагрузки, соответствующей часовому или двухчасовому расходу обрабатываемой воды. Эти сооружения, следовательно, имеют большую площадь поверхности и неэкономичны в строительстве. Кроме того, отстойник необходимо периодически опорожнять, чтобы удалить осевший осадок. Его применяют только при небольшом количестве осадка. Перед контактным статистическим отстойником обычно располагают смесительную камеру для быстрой диффузии реагентов в воде и флокулятор с устройством для медленного перемешивания, способствующего хлопьеобразованию (см. с. 76).

Статические тонкослойные отстойники. Существуют многочисленные типы статических отстойников, которые оборудованы полочными или трубчатыми блоками. Отстойник «Седипак» (рис. 7.4) объединяет в одном сооружении зону смешения воды и реагентов, добавляемых для очистки, флокулятор с установленными в нем полками с дефлекторами, применяемыми в отстойнике «Суперпульсатор» (см. с. 184) и зону отстаивания с полочными блоками. Осадок под действием силы тяжести опускается вниз и накапливается в воронке на дне отстойника.

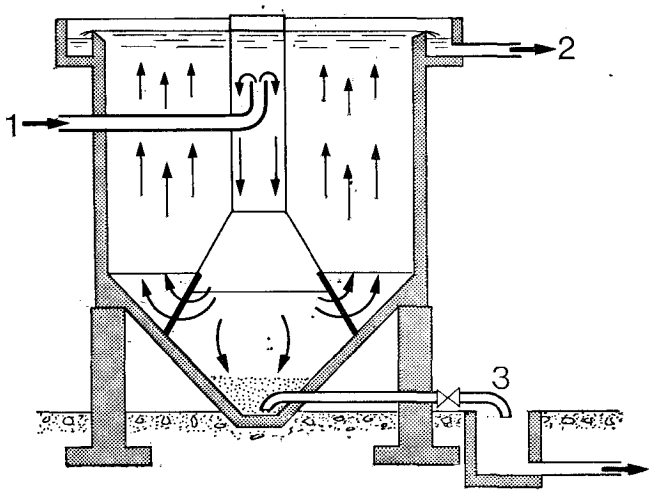


Рис. 7.3. Схема вертикального отстойника с коническим днищем

1 — поступающая сточная вода; *2* — осветленная сточная вода; *3* — выпуск осадка

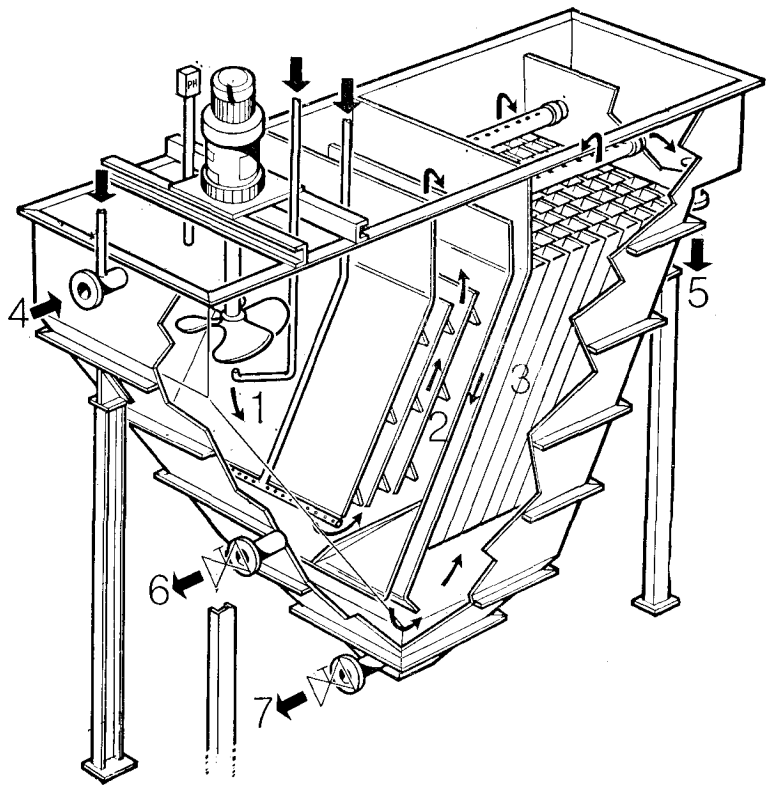


Рис. 7.4. Схема полочного статического отстойника типа «Седипак»:

1 — перемешивающее устройство; *2* — флокулятор; *3* — зона отстаивания; *4* — поступающая сточная вода; *5* — обработанная сточная вода; *6* — выпуск осадка; *7* — трубопровод опорожнения

7.2.1.2. Статические отстойники, оборудованные скребковым механизмом обычно используют для грубой обработки поступающей воды, ее первичной очистки и осветления и химической очистки сточных вод. Они служат также для очистки шахтных вод, вод от промывки угля и вообще всех вод, содержащих тяжелые вещества, выпадающие в осадок самопроизвольно.

Очень важно удалить осадок, как только он образовался. При использовании скребкового механизма осадок уплотняется, уменьшается в объеме и при этом сводятся к минимуму потери воды, удаляемой с ним. Осадок собирается скребками в один или несколько специальных приямков, откуда его удаляют.

Скорость движения скребковых механизмов, служащих для сбора осадка в приямок зависит от процентного содержания оседающих веществ в обрабатываемой воде и плотности осадка, образующегося в процессе отстаивания. Скорость возвратно-поступательного движения скребкового механизма в прямоугольных отстойниках принимается 1 см/с при очистке воды для питьевого водоснабжения и от 2 до 5 см/с при обработке сточных вод.

Многочисленные виды отстойников оборудованы скребковыми механизмами.

В круглых отстойниках скребковый механизм прикреплен к ферме, вращающейся вокруг центральной оси отстойника. Он может состоять из одиночного скребка (рис. 7.5) или из нескольких скребков, смонтированных в виде жалюзи (рис. 7.6).

В зависимости от способа очистки и требуемого качества очищенной воды целесообразно применять систему удаления всплывающих веществ с поверхности воды. Такие системы широко используют при очистке сточных вод.

Скребковые механизмы могут быть радиальные или диаметральные. В последнем случае донные скребки удваивают. Их подвешивают к вращающейся ферме, приводимой в движение приводом, расположенным или в центре отстойника, или на периферии сооружения.

Наиболее часто используют конструкцию радиального мостика с периферическим приводом. Электродвигатель через редуктор, установленный на мостике, приводит в движение ведущий каток, движущийся по борту отстойника. Поверхностные скребки жестко прикреплены к вращающемуся мостику, а илоскребы, расположенные у дна отстойника, прикреплены к нему на шарнирах.

Если система оборудована центральным приводом, то ферма состоит из двух радиальных консолей, подвешенных к зубчатому колесу, приводимому в движение от неподвижно укрепленного редуктора.

Поверхностные скребки и илоскребы изготовлены как одно целое с вращающейся конструкцией. Центральный привод мо-

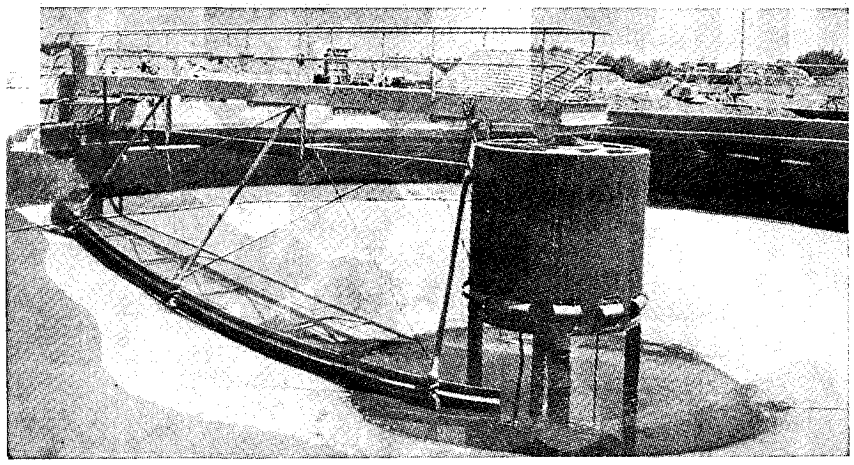


Рис. 7.5. Первичный отстойник диаметром 25 м с одиночным скребком для сбора осадка. Производительность 300 м³/ч. Станция очистки сточных вод в Исфахане, Иран

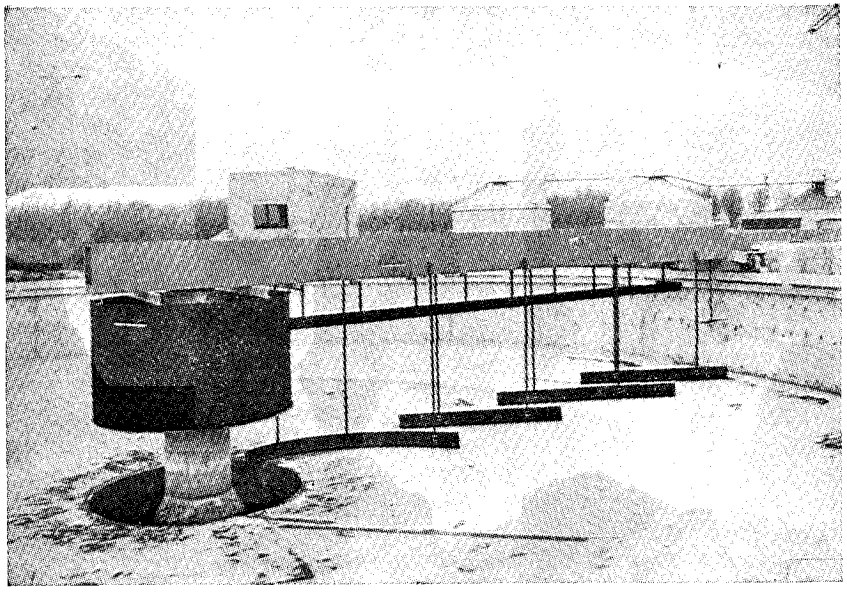


Рис. 7.6. Отстойник со скребковым устройством, смонтированным в форме жалюзи. Станция очистки сточных вод в Реймсе, Франция

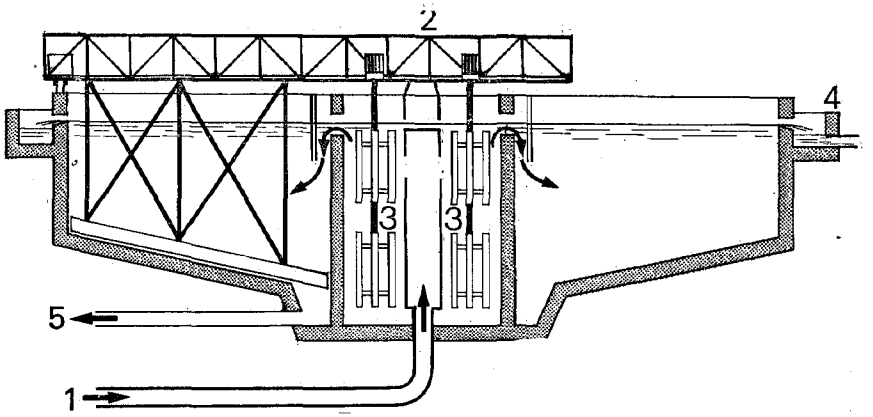


Рис. 7.7. Схема осветлителя-флокулятора без рециркуляции. Мостик илоскреба с периферийным приводом:

1 — поступающая сточная вода; *2* — мостик илоскреба; *3* — зона осветления; *4* — выпуск осветленной воды; *5* — удаление осадка

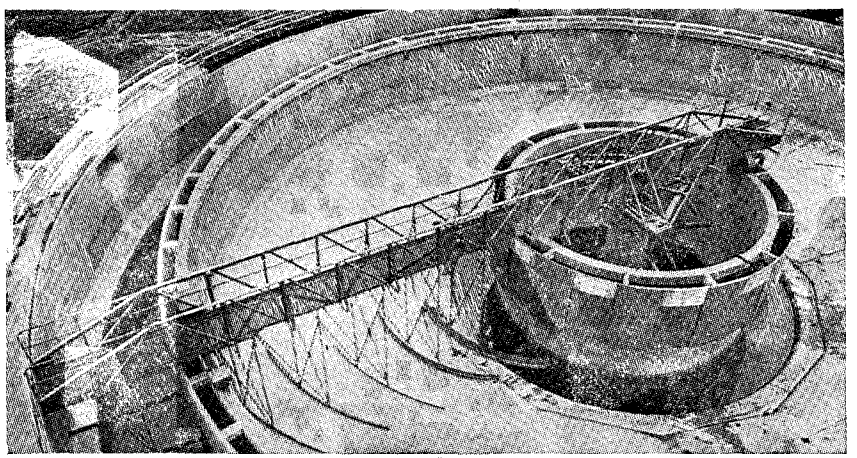


Рис. 7.8. Осветлитель-флокулятор диаметром 40 м с периферийным приводом мостика илоскреба

жет быть неподвижно закреплен на мостике или расположен на центральной бетонной колонне, опирающейся на дно отстойника. Уклон дна отстойника может быть от 4 до 10%. Осадок скребками собирается в приямок, расположенный в центре отстойника, откуда удаляется автоматически.

В центре круглого отстойника может быть установлен флокулятор с системой для медленного перемешивания.

Вода после флокуляции проходит через очень широкие отверстия без водослива (во избежание чрезмерной турбулентно-

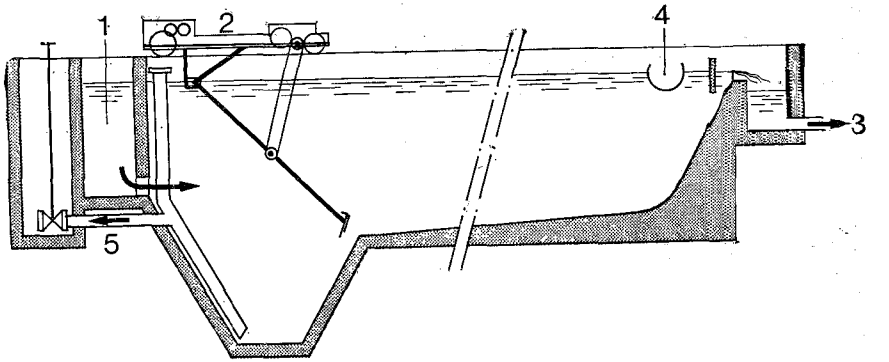


Рис. 7.9. Схема прямоугольного отстойника со скребковым устройством

1 — поступающая сточная вода; *2* — мостик илоскреба; *3* — выпуск обработанной воды; *4* — удаление всплывающих веществ; *5* — выпуск осадка

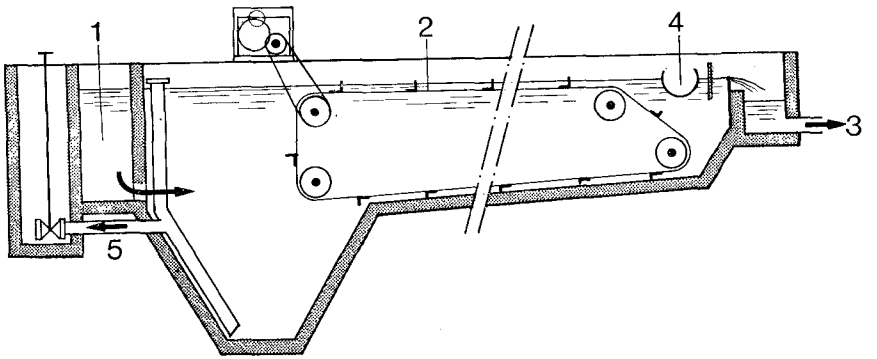


Рис. 7.10. Схема прямоугольного отстойника со скребковым механизмом

1 — поступающая сточная вода; *2* — скребковый цепной механизм; *3* — выпуск осветленной воды; *4* — удаление всплывающих веществ; *5* — выпуск осадка

сти) в периферийную зону отстаивания, где выпадают в осадок взвешенные вещества и флокулированные частицы.

Круглые отстойники, оборудованные скребковым механизмом, обычно имеют глубину воды у периферии сооружения от 2 до 3,5 м.

Прямоугольные отстойники имеют преимущество перед круглыми: они могут быть компактно совмещены с другими сооружениями, но обычно стоят дороже. Отношение длины к ширине допускается от 3 до 6. Глубина отстойника принята от 2,5 до 4 м. Уклон днища составляет 1%.

Скребковый механизм приводится в движение с помощью моста, перемещающегося от одного конца сооружения в другой и обратно, или с помощью цепного механизма, располагаемого под водой.

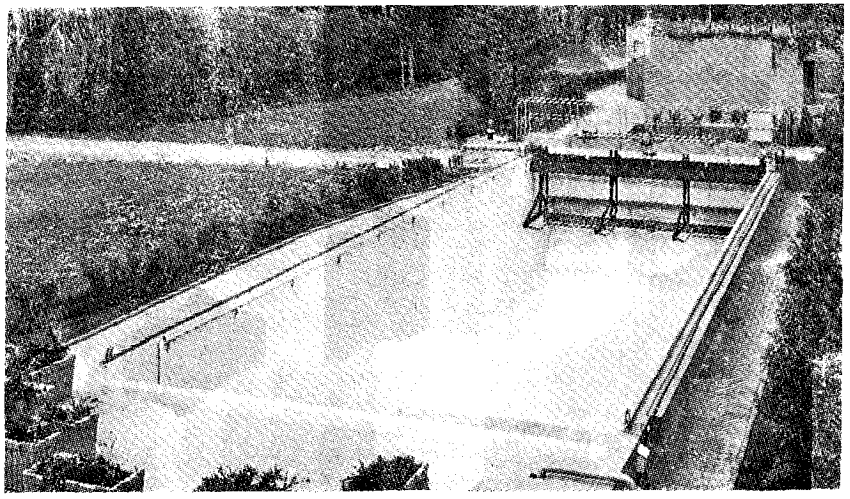


Рис. 7.11. Прямоугольный отстойник с поверхностным и донным скребками, смонтированными на мостике. Очистные сооружения во Франции

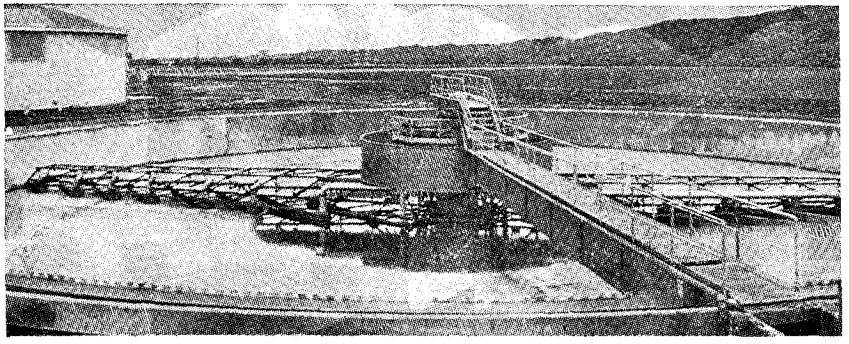


Рис. 7.12. Радиальный отстойник диаметром 41 м со скребковым устройством, приводимым в движение центральным приводом и илососами. Очистные сооружения во Франции

Иловые приямки устраивают ниже впуска воды в сооружение, а плавающие вещества с поверхности собирают перед выпуском осветленной воды. Илоскреб движется против движения воды в отстойнике, а поверхностный скребок — в противоположном направлении. Возвратно-поступательное движение скребков и мостика в отстойнике полностью автоматизировано.

Для одновременного сбора осадка в нескольких отстойниках можно использовать один мостик. Допускается принимать пролет мостика более 25 м.

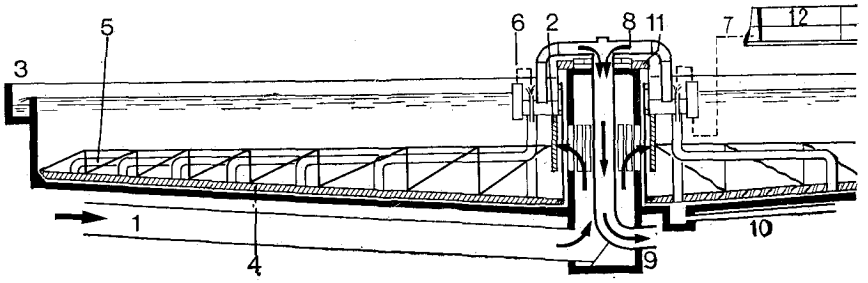


Рис. 7.13. Схема осветлителя, оборудованного илососами на радиальной ферме с центральным приводом

1 — поступающая сточная вода; *2* — перфорированная перегородка; *3* — сборный лоток; *4* — скребок; *5* — илососы; *6* — эрлифт; *7* — продувка воздухом; *8* — сифон для удаления ила; *9* — трубопровод для отвода ила; *10* — спускная труба; *11* — приводной механизм; *12* — мостик для свободного прохода

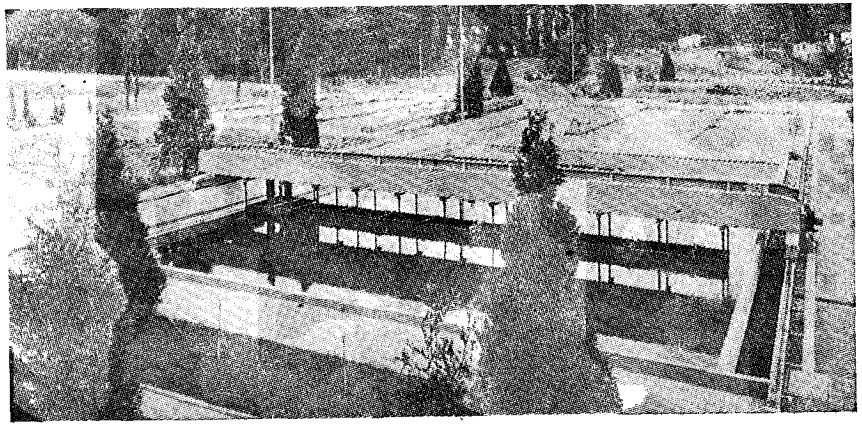


Рис. 7.14. Прямоугольный отстойник размером 21×29 м, оборудованный поперечным мостиком и илососами

Если в поступающей на очистку воде содержится небольшое количество взвешенных веществ, то один мостик может быть использован для нескольких сооружений. Причем он будет периодически перемещаться от одного отстойника к другому.

7.2.1.3. Статические отстойники с илососами используют в основном при биологической очистке сточных вод, когда необходимо ограничить время пребывания активного ила во вторичном отстойнике во избежание его разложения.

С увеличением диаметра сооружения число точек отбора ила из круглого отстойника может быть увеличено путем использования илососов.

Увеличение скорости вращения илоскребов в круглом отстойнике с целью более эффективного сбора ила к центру соо-

ружения невозможно без возникновения нежелательной турбулентности. Илососы можно применять как в круглых, так и в прямоугольных отстойниках.

В круглых отстойниках диаметром менее 40 м обычно используют радиальную конструкцию с периферийным приводом, в которой горизонтально закреплена илоприемная труба. Ряд труб, опускающихся к дну отстойника, соединены с илоприемной трубой.

Если диаметр отстойника больше 40 м, то илососы устанавливают не только по радиусу, но и по всему диаметру сооружения. Довольно часто они приводятся в движение с помощью привода, смонтированного в центре сооружения.

Всасывающий эффект илососов обеспечивается либо гидростатическим давлением, если уровень выпускных труб ниже уровня поверхности воды в сооружении, либо действием эрлифта.

Регулируя расход воздуха, можно контролировать расход ила отдельно в каждом сосуне.

Удаление ила из илоприемной трубы, которая вращается с помощью периферийного привода вместе с мостиком, происходит в центре отстойника с помощью сифона.

В прямоугольном отстойнике ил засасывается в илоприемную трубу, которая совершает возвратно-поступательное движение по сооружению в направлении, перпендикулярном движению воды. Удаляется ил из илоприемной трубы с помощью сифона или насосов. Особое внимание при проектировании отстойника должно быть уделено конструкции впуска, которая должна обеспечить распределение воды, исключить турбулентность в зоне отстаивания и предотвратить образование «мертвых» зон, где осадок может накапливаться.

7.2.2. СООРУЖЕНИЯ ДЛЯ ОТСТАИВАНИЯ ПРИ КОНТАКТЕ С ОСАДКОМ

7.2.2.1. Общие положения

Факторы, благоприятствующие флокуляции. Коалесценция коллоидных частиц и гидроксидов металлов возможна только при их контакте. Флокуляция значительно улучшается при медленном перемешивании жидкости. Возможность контакта между частицами возрастает с увеличением их концентрации в воде, что достигается в результате накапливания в жидкости части осадка, сформировавшегося ранее.

Перемешивать очищаемую воду, реагенты и осадок следует достаточно медленно, чтобы не разрушать хлопья или образовавшуюся коллоидную суспензию. Кроме того, весьма важно, чтобы частицы осадка, входящего в контакт с жидкостью, в процессе очистки были в таком же физическом состоянии, как и те частицы, которые образовались в результате добавления в воду

реагентов. Поэтому вновь вводимый в отстойник осадок не следует уплотнять, так как он обезвоживается в процессе длительного отстаивания. Обычно используют два вида сооружений для осветления воды в контакте с осадком.

- Осветлители с циркуляцией осадка. В них осадок отделяется от осветляемой воды в зоне отстаивания. Осадок затем возвращают в зону смешения, оборудованную механической («Акселатор», «Турбоциркулятор») или гидравлической («Циркулятор») системой перемешивания. В зону смешения поступает сырой сток, в который добавлены реагенты.
- Осветлители со взвешенным слоем осадка (типа «Пульсатор»). В этих сооружениях осадок не рециркулирует, а сохраняется в форме однородного взвешенного осадка с помощью потока воды, двигающегося снизу вверх. Очень небольшое перемешивание осуществляется при поступлении воды в сооружение.

Отделение осадка. Во взвешенном слое или в зоне рециркуляции осадок находится в состоянии суспензии; он занимает определенный объем, который может изменяться в зависимости от плотности осадка и восходящей скорости потока. При этом не происходит уплотнения осадка.

Осадок отделяется в спокойных зонах отстойника, хотя они занимают только малую часть сооружения. Осадок концентрируется в иловых приямках (они известны еще как концентраторы), откуда он удаляется открытием задвижек или с помощью сифона, контролируемых с помощью программирующего устройства.

Тонкослойное отстаивание. Принцип тонкослойного отстаивания применяется не только в контактных (статических) отстойниках, но и при отстаивании в контакте с осадком, благодаря чему скорость очистки воды увеличивается.

В отстойниках типа RPS с рециркуляцией осадка обычно используют трубчатые блоки; их выбирают с таким расчетом, чтобы они не забивались и работали надежно. Трубчатые блоки располагают в зоне отстаивания, при этом искусственно увеличивается рабочая площадь поверхности.

В осветлителях со взвешенным слоем осадка блоки располагают или в зоне отстаивания («Пульсатор» с полочными или трубчатыми блоками) или в самом взвешенном слое осадка («Суперпульсатор»). В первом случае блоки играют ту же роль, что и в статических отстойниках или в отстойниках с рециркуляцией осадка. Во втором случае блоки проектируют в виде полок с дефлекторами. Они играют двойную роль: во-первых, увеличивают эффективность очистки во взвешенном слое осадка, поддерживая медленное турбулентное движение жидкости в пределах блока и этим заметно уменьшая время, необходимое для флокуляции; во-вторых, они обеспечивают постоянную турбулентность потоков с сохранением между полками взве-

шенного слоя осадка за счет высокой восходящей скорости воды.

Применение. Отстойники, в которых вода отстаивается в контакте с осадком, могут быть применены во всех процессах очистки, в которых используют химические реагенты: при коагуляции коллоидных веществ (осветление), обеспечивании и удалении запаха, осаждении солей щелочно-земельных элементов (удалении карбонатов, умягчении), удалении железа и марганца, а также химической очистке сточных вод.

7.2.2.2. Отстойники с рециркуляцией осадка. Основная особенность этих отстойников — наличие зоны реакции и зоны осветления. Осадок, собранный со дна зоны осветления, подается в зону реакции. Эти осветлители, в принципе простые по конструкции, тем не менее должны очень тщательно проектироваться: необходимо учитывать не только их общую форму, но и конструктивные особенности самых мелких деталей, так как важно предотвратить выпадение осадка, обеспечить его циркуляцию без излишней турбулентности, а также обеспечить достаточный контакт осадка с водой без дополнительного его перемешивания.

Осветлитель «Циркулятор» оборудован гидравлической системой, обеспечивающей ускорение реакции при систематической циркуляции осадков, образующихся в процессе добавления реагентов к обрабатываемой воде.

Осветлитель довольно простой конструкции может эксплуатироваться в очистных установках средней производительности, где используются отстойники малого диаметра. Подобные осветлители часто применяют для ускорения процесса флокуляции и отстаивания под давлением. Очень удобно и выгодно использовать осветлители типа «Циркулятор» для небольших установок по очистке питьевой воды в сельской местности, когда двойное перекачивание воды вызывает осложнения в эксплуатации.

Обычно осветлители имеют коническое днище, что обеспечивает самопроизвольное сползание осадка к циркуляционному эжектору (рис. 7.15, с. 177).

В осветлителях очень большого диаметра, в которых невозможно обеспечить большой уклон дна, для сбора осадка к центру сооружения, предусмотрены вращающиеся скребки, идентичные тем, которые применяются в отстойниках (см. рис. 7.5 и 7.6).

Время пребывания осветляемой или умягчаемой воды в «Циркуляторе» колеблется от 45 мин до 2 ч. Восходящая скорость потока не должна превышать при осветлении воды 2 м/ч и при умягчении 5—7м/ч.

Осветлитель «Турбоциркулятор». Рециркуляция ила в осветлителе достигается с помощью осевой турбинки, не разрушающей скоагулированных хлопьев гидроксидов металлов, которые разрушаются при использовании гидравлического эжектора в осветлителе типа «Циркулятор». Это дает возможность использовать «Турбоциркулятор» для осветления и умягчения воды.

Зона реакции, расположенная в центре «Турбоциркулятора», позволяет осуществлять полную коагуляцию, флокуляцию, умягчение и даже окислительные реакции. С помощью непрерывно работающего скребкового механизма осадок сгребается к центру сооружения, откуда он или возвращается в зону осветления или собирается в иловой приямок, откуда после уплотнения периодически удаляется.

Осветлитель «Акселатор» типа NS состоит из центральной зоны, окруженной зоной отстаивания. Эти две зоны сообщаются между собой с помощью отверстий, расположенных вверху осветлителя и у его дна.

С помощью турбинки вода циркулирует из зоны реакции в зону отстаивания. Осадок из

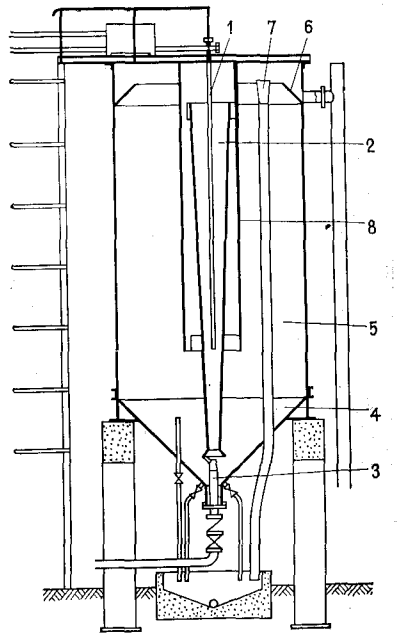


Рис. 7.15. Схема осветлителя типа «Циркулятор», используемого для удаления карбонатов

1 — передача реагентов; *2* — зона реакции; *3* — гидроэжектор; *4* — сборник осадка; *5* — зона осветления; *6* — сборный канал осветленной воды; *7* — перелив; *8* — отражательный кожух

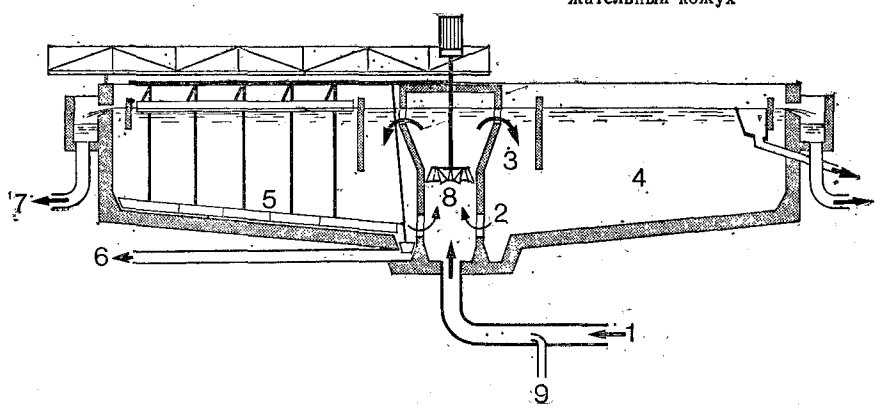


Рис. 7.16. Схема осветлителя типа «Турбоциркулятор»:

1 — поступающая сточная вода; *2* — рециркулирующий осадок; *3* — поступление хлопьев осадка в зону осветления; *4* — зона осветления; *5* — скребки; *6* — избыточный осадок; *7* — выпуск обработанной воды; *8* — трубинка для смешения поступающего стока и рециркулирующего осадка; *9* — подача реагентов

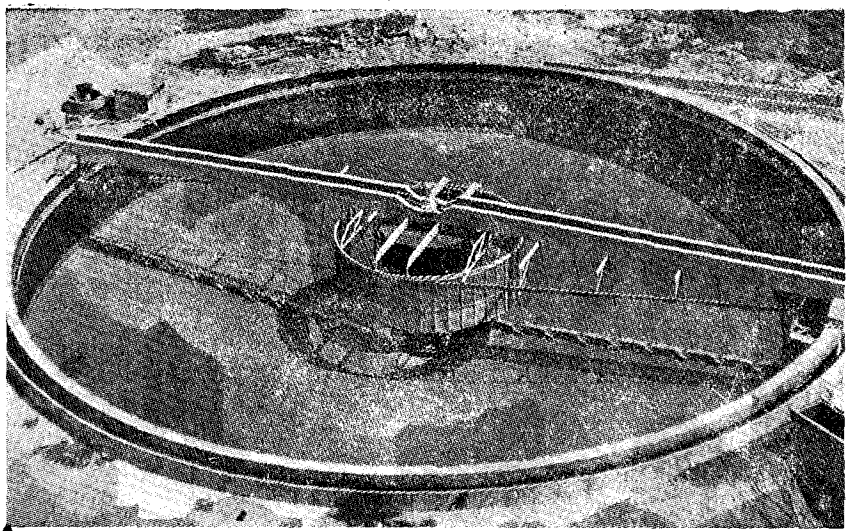


Рис. 7.17. Осветлитель типа «Турбоциркулятор» диаметром 53 м и производительностью 4000 м³/ч

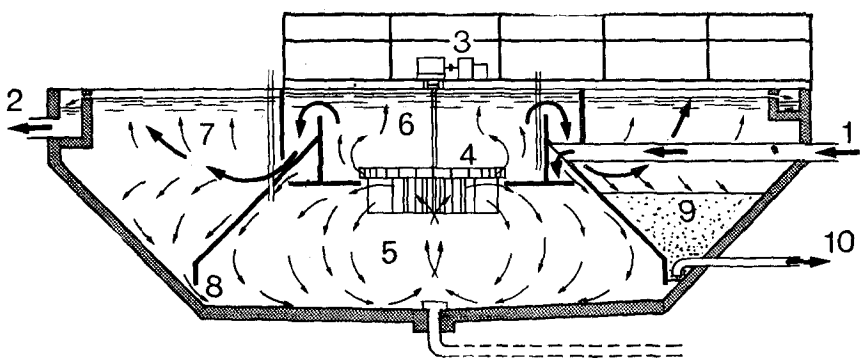


Рис. 7.18. Схема осветлителя типа «Акселатор NS»

1 — поступающая сточная вода; *2* — отвод осветленной воды; *3* — привод импеллерной мешалки; *4* — ротор импеллерной мешалки; *5* — первичная зона смешения и реакции; *6* — вторичная зона смешения и реакции; *7* — осветленная вода; *8* — возврат осадка; *9* — зона сбора осадка; *10* — выпуск избыточного осадка

зоны отстаивания возвращается в зону реакции. Повышение концентрации осадка в сооружении способствует быстрой флокуляции и образованию более плотного осадка. При необходимости донная мешалка может быстро смешивать поступающую воду, осадок и реагенты. Это предотвращает накопление тяжелых отложений, способных нарушить работу осветлителя.

В «Акселаторе» может быть один или несколько иловых приямков для сбора и удаления избытка уплотненного осадка.

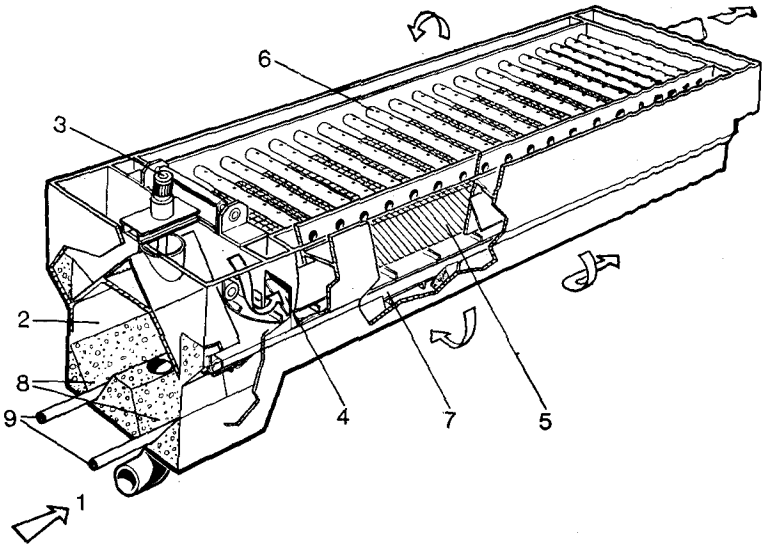


Рис. 7.19. Схема полочного отстойника типа RPS

1 — поступающая сточная вода; *2* — камера реакции; *3* — импеллер; *4* — канал подвода и распределения воды в зоне отстаивания; *5* — зона отстаивания с установленными в ней наклонными блоками; *6* — трубопроводы для сбора осветленной воды; *7* — илоскреб; *8* — иловые приямки; *9* — трубопровод удаления осадка

Осветлитель «Акселатор» типа IS — разновидность осветлителя, оборудованного скребками в нижней части сооружения. Выпавший осадок с помощью скребков собирается в иловой приямок, расположенный на уровне дна, откуда и удаляется.

Прямоугольный тонкослойный отстойник типа RPS с полочными блоками, расположенными в зоне отстаивания, по своей конструкции напоминает осветлитель «Турбоциркулятор».

Камера реакции сооружения оборудована осевой импеллерной мешалкой, обеспечивающей рециркуляцию ила через горизонтальный канал, соединяющий нижнюю часть камеры с зоной отстаивания. В данной части камеры реакции расположен иловой приямок. Осадок, собранный с помощью скребков в зоне отстаивания, подается в камеру реакции, откуда или рециркулирует, или после уплотнения удаляется.

Смесь воды и осадка из камеры реакции равномерно распределяется с помощью двух горизонтальных каналов по всей длине зоны отстаивания. Осветленная вода собирается с помощью ряда перфорированных труб, равномерно располагаемых по всей площади сооружения над распределительными каналами.

Если в сооружении обрабатывается большой объем воды, то оно может состоять из двух зон отстаивания, расположенных по обеим сторонам камеры реакции. Небольшие отстойники могут не оборудоваться скребковыми механизмами.

7.2.2.3. Осветлители со взвешенным слоем осадка.

Принцип осветления воды во взвешенном слое. На первый взгляд может показаться, что для определения размеров отстойника достаточно провести в лабораторных условиях измерения скорости следующим способом: поместить осадок в стеклянную трубку и, пропуская через него воду снизу вверх, измерить скорость потока, выше которой осадок начинает выноситься водой. Но, как показывает практика, уже через несколько минут осадок не остается в состоянии суспензии, а начинает накапливаться первоначально у внутренней стенки и через некоторое время образуется компактная масса уплотненного осадка, в котором вода промывает канал. Разумеется, при этих условиях не достигается эффективного контакта между осадком и водой, проходящей через стеклянную трубку.

С другой стороны, если воду пропускать по трубке через определенные промежутки времени, что достигается вводом большого количества воды в течение очень короткого времени, после которого следует сравнительно длительный период покоя, то обнаружим, что масса осадка остается в состоянии суспензии. Весь осадок переносится по направлению вверх в результате быстрой подачи, но в последующий спокойный период оседает с постоянной скоростью, как это происходит в воде, находящейся в состоянии абсолютного покоя. Это основной принцип измерения коэффициента когезии осадка (№ 705, с. 985). В результате образуется слой осадка, однородный во всех точках.

Если через взвешенный слой осадка в вертикальном направлении пропускать воду, то обнаружится, что объем, занимаемый осадком, возрастает с увеличением скорости потока. Но это справедливо только в определенном интервале значений, вне которого объем осадка увеличивается настолько, что его частицы будут находиться на таком расстоянии друг от друга, когда сила гравитации недостаточна для поддержания их сцепления. Осадок при этом выносится вверх с водой и взвешенный слой осадка разрушается. Предельная скорость потока устанавливается такая, чтобы она не превышала максимальную, при которой осветлитель может работать. Максимальная скорость зависит от многих факторов: температуры, вида воды и т. д. Она может быть определена с помощью теста № 705 (см. с. 985), применяемого для измерения коэффициента когезии осадка *K*.

Взвешенный слой осадка можно сравнить с витками пружины, которая сжата благодаря силам гравитации, но может быть растянута в большей или меньшей степени под воздействием, оказываемым водой на частицы осадка, составляющие эту «пружину», растяжение «пружины» увеличивается с повышением скорости потока воды. Разрушение взвешенного слоя можно предотвратить выбором приемлемых скоростей потока воды. Сопротивление его, а следовательно, и максимально возможная

скорость движения потока воды могут быть увеличены путем увеличения коэффициента когезии во взвешенном слое осадка в результате добавления в воду таких флокулянтов, как активная кремнекислота или полиэлектролиты. При повышении концентрации ила и обеспечении его хорошего контакта с водой максимальная скорость движения воды может возрасти вдвое с одновременным уменьшением турбулентности потока, проходящего через взвешенный слой осадка. Вышеуказанные процессы используются в осветлителе с полочными блоками типа «Суперпульсатор» (см. с. 79 и 184).

Если расположить внутри взвешенного слоя осадка, увеличенного в объеме восходящим потоком воды какую-либо емкость без крышки, то можно обнаружить, что ил собирается и уплотняется внутри этой емкости. Это легко объяснимо, так как вода здесь не циркулирует и на осадок не действуют силы, увеличивающие его в объеме. Емкость, таким образом, включает зону низкого давления (когда «пружина» находится в естественном сжатом состоянии), окруженную зоной высокого давления (когда «пружина» растянута трением воды). Поэтому вполне естественно, что поток осадка быстро движется из зоны высокого давления в зону низкого давления. Сосуд служит как бы концентратором осадка, из которого избыток его удаляется.

Осветлитель типа «Пульсатор» (патент Франции № 1115038 и патентуется в других странах) представляет собой конструкцию, разработанную на основании результатов лабораторных и теоретических исследований, изложенных выше. В этом сооружении используется высокая восходящая скорость потока (выше 8 м/ч), зависящая от вида взвешенных веществ (см. рис. 7.20, с. 183).

Осветлитель состоит из плоскодонного резервуара, в основании которого расположены ряды перфорированных труб *8*, с помощью которых поступающая вода *1* равномерно распределяется по осветлителю. В верхней части сооружения также установлен ряд перфорированных труб или каналов *2* для равномерного сбора осветленной воды, что предотвращает возникновение неравномерных скоростей в различных частях отстойника.

Существуют различные способы ввода воды через определенные интервалы с помощью донной системы труб, но все они требуют аккумуляции на какой-то период времени определенного объема поступающей воды, а затем как можно более быстрого ввода ее в сооружение. Наиболее эффективный метод — подача поступающей воды в вакуумную камеру *5*, из которой воздух в количестве, приблизительно равном половине расхода очищаемой воды, отсасывается вакуумным насосом *6*. Вакуумная камера сообщается с донной системой труб осветлителя. В этих условиях уровень поступающей воды в вакуумной камере постепенно повышается. Когда он превысит уровень воды в осветлителе на 0,6—1 м, замыкается контакт электрического

реле и быстро открывается задвижка *7*, по которой поступает воздух. Под действием атмосферного давления вода, находящаяся в камере, с большой скоростью поступает в осветлитель.

Режим работы камеры следующий: вода из вакуумной камеры поступает в осветлитель на 5—10 с, время наполнения этой камеры 30—40 с.

Воздух удаляется из вакуумной камеры или вентилятором, или электрической воздуходувкой, действующими как вакуумный насос. Задвижка, с помощью которой вакуумная камера соединяется с атмосферой, открывается или закрывается, если вода поступает выше или ниже указанного уровня.

Поперечное сечение водосборника у дна отстойника благоприятствует уменьшению потерь напора. Отверстия во всех трубах, распределяющих воду, расположены так, чтобы в нижней половине отстойника образовался однородный взвешенный слой осадка. Слой совершает возвратно-поступательное движение и может увеличиваться в объеме за счет флокулянтов и примесей, содержащихся в поступающей воде. Увеличение объема взвешенного слоя осадка происходит постепенно. Определенная зона сооружения используется в качестве илового сборника *9* с наклонным дном, в котором собирается и уплотняется избыток осадка. Осадок из сборника периодически удаляется с помощью выпускных труб *3*. Применяемое в осветлителе оборудование не имеет системы механического перемешивания, которая может разрушать уже сформировавшиеся хлопья осадка. Благодаря высокой концентрации частиц во взвешенном слое и его буферному действию, изменение величины pH поступающей воды или несовершенность регулировки нагрузки не оказывают неблагоприятного воздействия. В процессе очистки наблюдается постепенное изменение мутности осветляемой воды без какого-либо выноса ила из сооружения.

Принцип работы осветлителя типа «Пульсатор» можно очень легко использовать при переоборудовании уже существующих сооружений, старых фильтров или резервуаров. В результате модернизации этого оборудования его производительность может быть увеличена в 2 и 3 раза. Такая модернизация оборудования произведена на очистной станции производительностью 300 тыс. м^3/сут в Буэнос-Айресе, Дурбане и на других станциях.

Осветлитель типа «Пульсатор», оборудованный полочными блоками. Установка в «Пульсаторе» полочных блоков выше взвешенного слоя осадка позволяет улучшить качество осветленной воды при той же восходящей скорости потока по сравнению с результатами очистки в обычном «Пульсаторе» без полочных блоков или увеличить восходящую скорость потока воды. Применяемые полочные или трубчатые блоки изготовляют из пластмассы. Их располагают в осветлителе под углом 60° к горизонтальной плоскости (рис. 7.21).

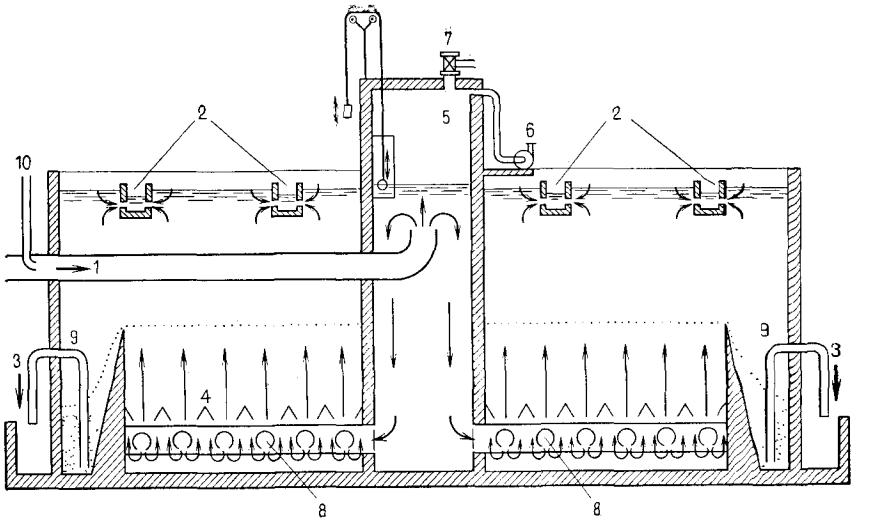


Рис. 7.20. Схема осветлителя типа «Пульсатор»

1 — поступающая сточная вода; *2* — отвод осветленной воды; *3* — выпуск осадка; *4* — полки для уменьшения скорости потока; *5* — вакуумная камера; *6* — вакуумный насос; *7* — устройство для автоматической разгерметизации; *8* — перфорированные трубы для распределения поступающей сточной воды; *9* — илосборник; *10* — ввод реагента

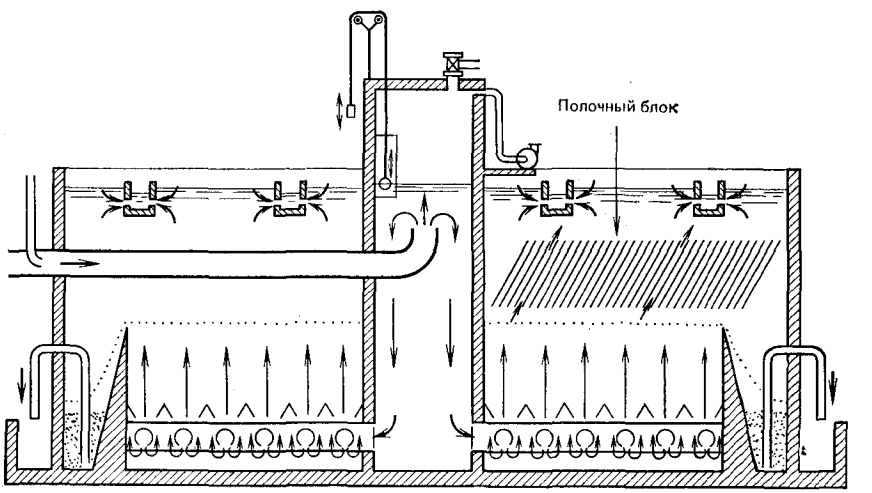


Рис. 7.21. Схема полочного осветлителя типа «Пульсатор»

Частицы хлопьев, выносимые за пределы взвешенного слоя осадка, осаждаются на нижней поверхности блоков и аккумулируются. Образовавшаяся тонкая пленка сползает во взвешенный слой осадка.

Осветлитель типа «Суперпульсатор». В нем сочетаются преимущества отстаивания в контакте с осадком, пульсации взве-

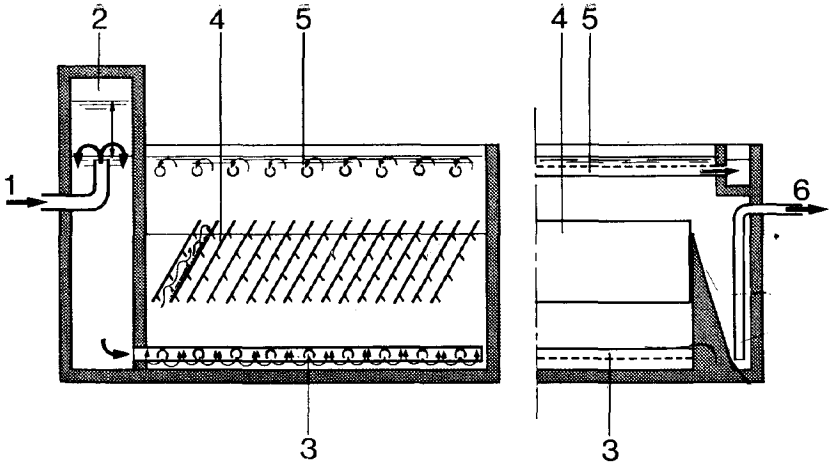


Рис. 7.22. Схема осветлителя типа «Суперпульсатор»

1 — подвод сточной воды; *2* — вакуумная камера; *3* — перфорированные трубы для распределения воды; *4* — полочные блоки; *5* — перфорированные трубы для сбора осветленной воды; *6* — выпуск осадка

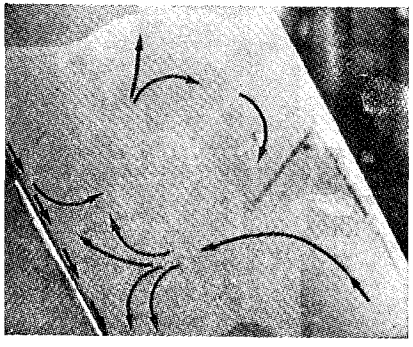


Рис. 7.23

шенного слоя осадка и осаждения в тонком слое. Конструкция сооружения имеет много общего с «Пульсатором», но рабочие характеристики его лучше. Сохранен принцип подачи и распределения воды в основное оборудование.

Смесь коагулированной воды и флокулированного осадка поднимается параллельными потоками вертикально вверх, пересекая зону, расположенную между донными распределительными трубами и наклонными полочными блоками, в которые вода поступает равномерно. Перегородки для уменьшения скорости потока, используемые в «Пульсаторе», в «Суперпульсаторе» не применяются.

Флокулированная вода с помощью распределительной системы равномерно поступает в систему полочных блоков, расположенных под углом 60° к горизонтальной плоскости и перпендикулярно к илосборнику. На нижней стороне каждой полки установлены отражатели, которые поддерживают полку в определенном положении и способствуют образованию медленного вихревого движения воды.

Полки с отражателями во взвешенном слое дают возможность поддерживать вдвое большую концентрацию осадка, чем

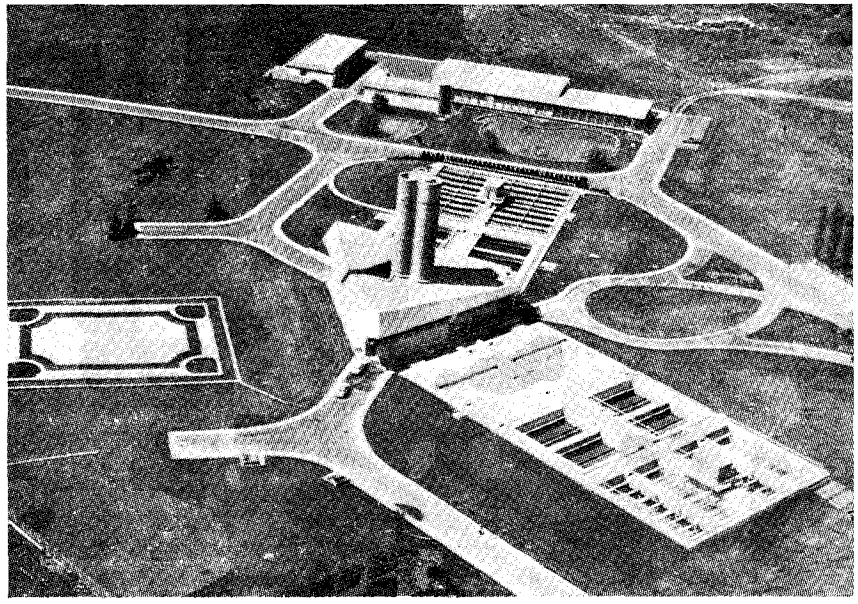


Рис. 7.24. На переднем плане осветлитель типа «Суперпульсатор» с площадью поверхности 416 м² и производительностью 3100 м³/ч. Станция очистки воды в южном округе Парижа

в «Пульсаторе» при тех же рабочих скоростях. Высокая концентрация осадка во взвешенном слое, достигающая иногда 50% по объему, дает возможность «Суперпульсатору» выполнять функции фильтра загрязнений, что определяет преимущество осветлителей с большой концентрацией взвешенного слоя осадка. Как и в «Пульсаторе», верхняя поверхность взвешенного слоя ограничена переливом в зону сбора осадка, где не действуют силы, вызывающие движение воды вверх, а возврат осветленной воды осуществляется с помощью системы коллекторов. Гибкость эксплуатации этого сооружения позволяет очень быстро запускать его в работу.

7.2.3. ВСПОМОГАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОТСТОЙНИКОВ

7.2.3.1. Классификация устройств для удаления осадка. При флокуляции воды или химическом осаждении осадок, образующийся в процессе очистки, концентрируется в иловых приямках; исключение составляют горизонтальные осветлители без скребковых систем (их полностью опорожняют в период очистки). Осадок может быть удален из приямков непрерывно действующей системой, но предпочтительнее удалять его периодически.

Частота и продолжительность операции по удалению осадка могут регулироваться двумя взаимосвязанными реле времени или, еще лучше, таким автоматическим устройством, как «Хроноконтакт 401Е» (рис. 7.25).

Кратковременный поток осадка более интенсивен и обладает достаточным напором, обеспечивающим высокие скорости в системе труб во избежание их засора и заиливания.

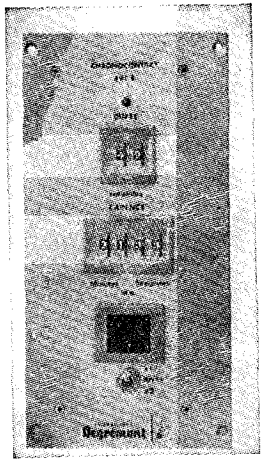


Рис. 7.25. Хроноконтакт 401 Е

Оборудование для удаления осадка состоит из автоматических задвижек, сифонов и насосов.

Автоматические задвижки применяют диафрагменные или муфтовые. Они закрываются при давлении воздуха или воды на мембрану или муфту. Открытие задвижки обеспечивается трехходовым соленоидным клапаном, расположенным в контуре движущей жидкости и соединенным с таймером.

Сифоны служат для удаления осадка из приямков в осветлителях типа «Пульсатор» и «Суперпульсатор». Сифон заполняется в результате подсоединения его верхней части к вакуумному вентилятору или воздуходувке. Осадок из сифона сливается, если открыть трубку, соединяющую его с атмосферой.

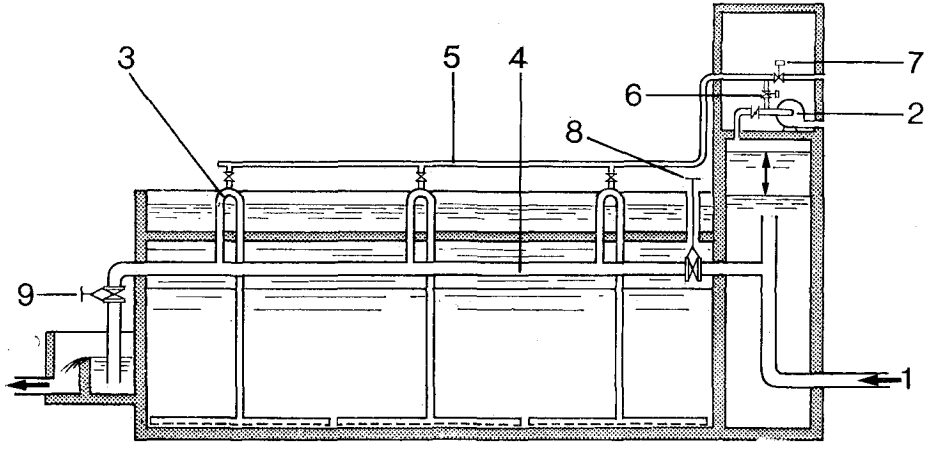


Рис. 7.26. Схема удаления осадка с использованием сифона, применяемая в осветлителях типа «Пульсатор» и «Суперпульсатор»

1 — подача сточной воды; *2* — вакуумный насос; *3* — отвод осадка при помощи сифона; *4* — основная труба для отвода осадка; *5* — сифонные трубы с давлением ниже атмосферного; *6* — соленоидный клапан; *7* — вентиляционная труба; *8, 9* — автоматические задвижки для управления процессом

Высококонцентрированный осадок удаляется с помощью насосов. Их применяют при очистке очень грязной воды в осветлителях, в которых осадок собирается скребковым механизмом с центральным приводом. Насосы могут быть расположены в центральной колонне отстойника (рис. 7.28), что дает возможность удалить осадок поверху.

Когда приток воды, поступающий в осветлитель, непостоянен, частота выгрузки осадка из него должна соответствовать колебаниям расхода. Это позволяет получить осадок с максимальной концентрацией и обеспечить минимальные потери воды с ним. Этот процесс может управляться автоматически с помощью таймера «Хроноконтакт 401Е», работающего одновременно с «Хроноконтактом 402Е» (см. с. 567). «Хроноконтакт 401Е» открывает задвижку на выпуске осадка на определенное время, через интервалы, пропорциональные расходу, проходящему через отстойник.

В некоторых случаях требуется удалять из отстойника осадок определенной концентрации. Эту концентрацию определяют измерением адсорбции гамма-лучей и сверхзвуковых волн осадком. Может быть использован мутномер фирмы «Дегремон», описание которого приводится на с. 575.

Достаточно точное представление о концентрации осадка дает измерение вращающего момента, развиваемого на приводной головке скребкового механизма.

Если выгрузка осадка контролируется с помощью приборов, измеряющих концентрацию в единицах массы, то проверять уровень взвешенного слоя осадка в осветлителе можно, используя фотооптическое устройство. Следует избегать случайного перелива осадка, если, например, увеличивается расход воды.

При ручном управлении удалением осадка используют телескопические трубы, которые контролируют визуально. Ил может быть удален из статических круглых или прямоугольных отстойников с помощью илососов (см. с. 173).

7.2.3.2. Скребки для осадка и всплывающих веществ. *Круглые отстойники.* Если требуется незначительное усилие для перемещения осадка скребками по направлению к центру сооружения, то применяют радиальный и диаметральный вращающийся мостик с периферийным приводом. Ножи скребкового механизма с помощью стержней подвешены на шарнирах к мостику, благодаря чему последний не подвержен действию крутящего момента. В центре сооружения мостик опирается на вращающуюся опору, которая допускает прогиб его в вертикальной плоскости, а по краям — на приводное устройство, состоящее из ведущего колеса, соединенного с редуктором и двигателем, а иногда он опирается и на опорный подшипник направляющего колеса.

В том случае, если мостик имеет только одно колесо, которое выполняет функцию опорного подшипника и ведущего колеса и обеспечивает лучшее сцепление с рельсовым путем для дан-

ной нагрузки, то жесткость этой конструкции должна быть достаточной, чтобы противостоять скручивающему усилию, вызываемому двигателем с большим пусковым моментом. Питание двигателя осуществляется от кольцевого токоприемника с щетками.

При диаметре отстойника 20—25 м (если образуется сравнительно легкий осадок) донный скребок представляет собой одиночный профилированный нож, установленный под углом к радиусу отстойника так, что осадок легко сгребается по направлению к центру. Если диаметр отстойника больше указанного, невозможно использовать одиночный скребок для сбора осадка к центру, так как угол скольжения осадка по поверхности скребка оказывается недостаточным. В этом случае используют механизм с несколькими скребками, установленными на раме в виде жалюзи с углом наклона скребков, уменьшающимся от периферии к центру. Это приспособление может быть использовано и в небольших отстойниках, если осадок плохо соскальзывает со скребка.

Диаметральный вращающийся мостик состоит из двух радиальных вращающихся мостиков, объединенных в центре общей опорой; каждый из них имеет свой приводной механизм.

Периферийный привод на отстойниках не применяется, если усилие на скребок вызывает его отклонение от рабочего положения. Это усилие возрастает с увеличением диаметра сооружения; оно соответствует крутящему моменту, отнесенному к площади поверхности, с которой сгребается осадок, и не должно превышать 10 дкН·м/м^2.

Когда для сгребания необходимого количества осадка определенного качества требуются бо́льшие усилия (40—50 дкН·м/м^2), используют диаметральные скребковые механизмы с приводом, расположенным в центре (рис. 7.28).

Клетка, на которой крепится диаметральная конструкция, поддерживающая скребки вокруг центральной колонны осветлителя, подвешена к приводному механизму, опирающемуся на эту колонну. Приводной механизм «Центридег» фирмы «Дегремон» (рис. 7.27) оборудован двумя редукторами, соединенными карданной передачей и приводимыми в действие одним электродвигателем. Два редуктора создают высокий вращающий момент. Приводной механизм «Центридег» имеет верхний предел для создаваемых номинальных вращающих моментов более 100 000 дкН·м.

В круглых отстойниках сбор плавающих веществ всегда производится по направлению от центра к периферии сооружения. Скребок наклонен к радиусу в направлении, противоположном илоскребку. На периферии концы скребка, соединенные шарнирно, собирают плавающие вещества к наклонной поверхности бункера, верхняя кромка которого расположена выше уровня воды. Трубопроводы, соединяющие бункер с внешней

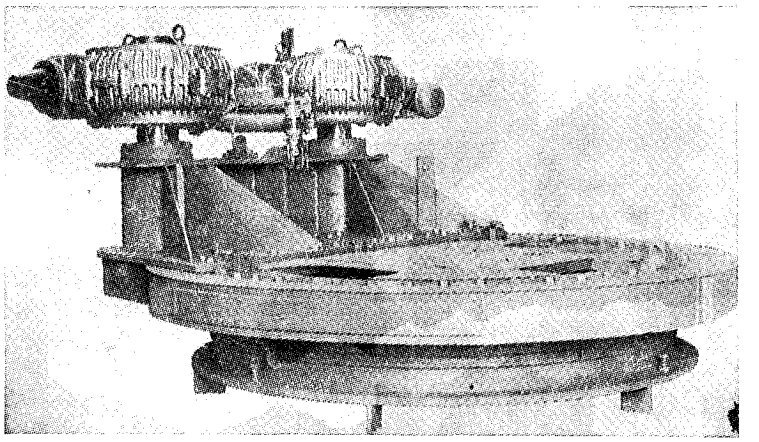


Рис. 7.27. Приводной механизм типа «Центридег»

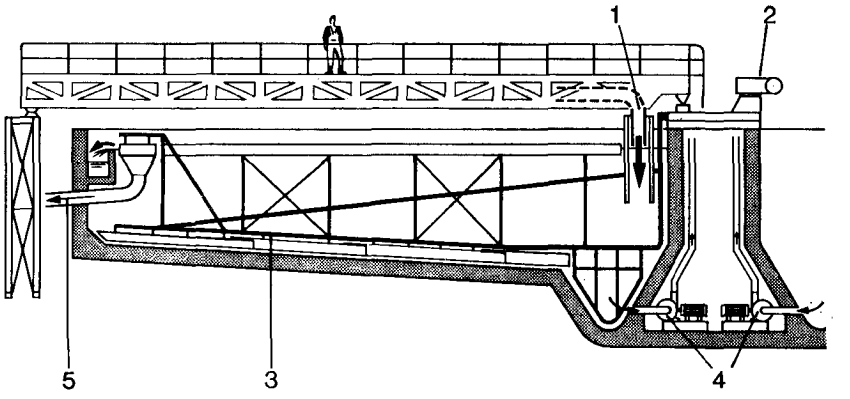


Рис. 7.28. Схема уплотнителя с центральным приводом
1 — подача осадка; *2* — приводной механизм типа «центридег»; *3* — скребковое устройство; *4* — насосы для удаления осадка; *5* — удаление плавающих веществ

стороной осветлителя, должны быть запроектированы таким образом, чтобы их не забивало плавающими веществами.

Прямоугольные отстойники. В этих отстойниках осадок, осевший на дно, собирается в приямок, расположенный у впуска воды в сооружение. Скребковый механизм приводится в движение с помощью бесконечной цепи (см. рис. 7.10), но чаще всего применяют скребковый механизм, изготовленный как одно целое с мостиком, который установлен в пролете отстойника, и двигается от одного конца сооружения к другому. При движении против течения воды мостик волочит по дну илоскребки, которые собирают осадок в приямок. В конце поступательного

движения мостик останавливается и скребок автоматически поднимается лебедкой или до уровня воды, и тогда при возвратном движении плавающие вещества с помощью скребка собираются в канал, расположенный в нижнем конце сооружения, или выше уровня воды, если мостик оборудован отдельным скребком для сбора плавающих веществ.

Автоматическое управление мостиком этого типа иногда оказывается очень сложным, например, если в начале работы скребка необходимо обеспечить автоматическое его прохождение под сборным каналом или в случае недостатка энергии для автоматического возобновления работы мостика после его остановки.

7.3. ФЛОТАЦИЯ

7.3.1. ОСНОВНЫЕ СИСТЕМЫ ФЛОТАЦИИ

Определение понятия флотации и теория ее кинетики рассмотрены в гл. 3, с. 79. Флотация широко используется в горной промышленности. Этот процесс основан на принципе отделения твердых веществ, обладающих различной способностью смачиваться водой (см. с. 191 — Механическая флотация).

При очистке воды или обработке осадка, образовавшегося в результате очистки воды, обычно не требуется выделять из суспензии какие-то определенные вещества и оставлять в ней другие. Если такое разделение веществ и желательно, то ценность выделяемых продуктов не всегда компенсируется стоимостью затраченных реагентов.

Флотация может быть самопроизвольной, если плотность отделяемых частиц меньше, чем у воды. Она может быть вызвана искусственно прикреплением пузырьков воздуха или газа к удаляемым частицам, в результате чего — плотность частиц оказывается меньше, чем у воды.

Совершенно похожее, но нежелательное явление — образование пены внутри метантенка, которая может содержать 20—40% сухого вещества несмотря на то, что плотность их только 0,8—0,7 кг/л.

Самопроизвольное флотационное уплотнение наблюдается в результате ферментации в больших сборниках органического ила, расположенных в пустынных районах.

7.3.1.1. Самопроизвольная флотация используется в основном для первоначального отделения масел в процессе очистки стоков нефтеочистительных заводов, прокатных станов и т. д. На рис. 7.30 показаны восходящие скорости потока v, мм/с, для различных по размеру капелек углеводородов. Эти величины используют как основные параметры для расчета статического сепаратора масел.

Для очистки воды, не содержащей парафиноподобных или других объемных отходов, с внутренней стороны сепаратора может быть смонтирован ряд параллельных наклонных пластинок с расстоянием между ними в несколько сантиметров (см. с. 132). Эти пластинки выполняют две функции: улучшают распределение в вертикальной плоскости воды, из которой должно быть отделено масло, и способствуют коалесценции, так как имеют большую площадь поверхности контакта.

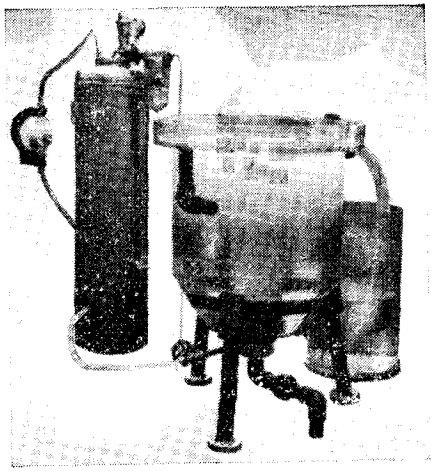


Рис. 7.29. Пилотная флотационная установка

Масло накапливается под нижней поверхностью пластинок и затем движется по направлению вверх. Однако пластинки часто осложняют эксплуатацию, поскольку неизбежна периодическая очистка их.

7.3.1.2. Механическая флотация. В этом процессе применяют механическое диспергирование пузырьков воздуха размером от 0,1 до 1 мм. Механическую флотацию используют главным образом с целью обогащения руд вспениванием. Из дробленой руды с размером частиц менее 0,2 мм готовят водную суспензию, к которой добавляют пенообразующее вещество и коллектор-агент, способствующий слипанию пузырьков воздуха и частиц руды и придающий им гидро-

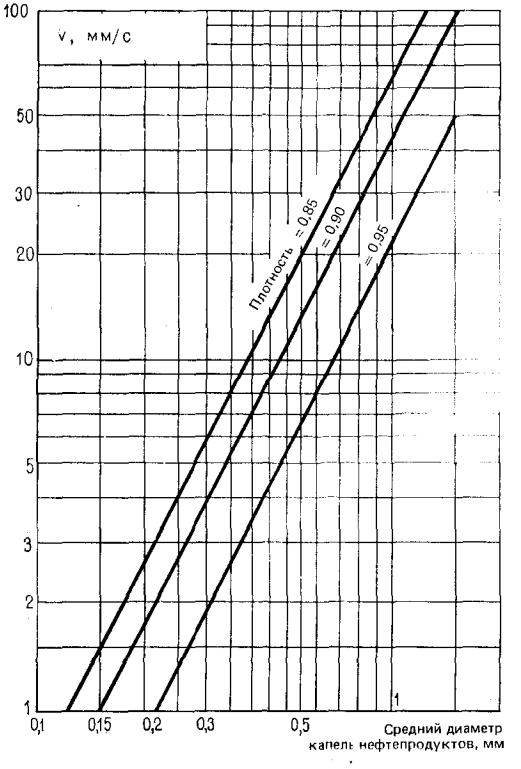


Рис. 7.30.

фобность. Иногда для усиления действия коллектор-агента к суспензии добавляют активатор. При необходимости сепарации определенных веществ в воду добавляют селективные депрессанты, подавляющие флотацию нежелательных примесей. Часто требуется корректировка pH.

Кондиционированная таким образом суспензия вводится в центр ротора, вращающегося с большой скоростью и одновременно засасывающего воздух. Дробление воздушных пузырьков обычно происходит во время продавливания эмульсии через кожух, окружающий ротор.

Этот процесс не применяется для воды, в которой отделяемые примеси образуют более или менее легкие осадки.

Одним из вариантов процесса механической флотации, применимого к обработке воды, является диспергирование воздуха с помощью системы «Вортимикс», описанной на с. 229.

7.3.1.3. Флотация с применением продувки жидкости пузырьками воздуха. Это самопроизвольная флотация, интенсифицированная продувкой жидкости воздухом (диаметр пузырька несколько миллиметров).

Для образования пузырьков используют пористые материалы. Когда обрабатываются высококонцентрированные жидкости, пузырьки средних размеров рассеиваются таким образом, чтобы вызвать турбулентное движение, поддерживающее распределение пузырьков воздуха. Размеры пузырьков должны быть достаточно маленькими, чтобы обеспечить их прикрепление к флотируемым частицам.

Для удаления легких веществ (жиров, нефтепродуктов, больших волокон бумаги и т. д.) в установках обычно предусмотрены две раздельные зоны: в первой происходит смешивание и эмульгирование, а во второй, спокойной зоне, — флотация. На рис. 7.31 показан принцип работы.

В зоне эмульгирования взвешенные вещества взбалтываются и перемешиваются воздухом. Путь пузырьков увеличивается в результате движения потока по спирали. В зонах отделения и сбора флотируемых веществ пересекающий поток очень медленный и турбулентность уменьшается.

7.3.1.4. Флотация с применением растворенного воздуха. Область практического применения термина «флотация» при очистке воды ограничена процессами, использующими очень маленькие пузырьки или микропузырьки размером 40—70 мкм подобные тем, которые содержатся в «белой воде», вытекающей из крана магистрального трубопровода высокого давления.

Флотация твердых частиц подчиняется тем же законам, что и процессы седиментации (см. с. 69), но в «обратном» поле сил. Прежде всего, это флотация, подчиняющаяся закону Стокса. В случае флокулированных частиц или очень тяжелой суспензии происходит «диффузная флотация». Кроме того, возможна

флотация через взвешенный слой осадка (см. с. 72). Однако есть основания подумать, как создается этот слой и в какой степени он может рассматриваться как однородный.

Однородность и непрерывность обусловлены диаметром пузырьков, выделяемых в жидкость.

Скорость движения v пузырьков вверх в зависимости от их диаметра **d** показана на рис. 7.32. Пузырьки диаметром 20 мкм движутся вверх со скоростью, равной нескольким миллиметрам в секунду, тогда как у пузырьков диаметром в несколько миллиметров скорость в 10—30 раз больше. Если эмульсия вводится в одной точке сооружения, а выводится в другой, то период иммерсии пузырьков воздуха в воде, а также пространство, заполняемое пузырьками, будет больше при меньшей скорости движения пузырьков

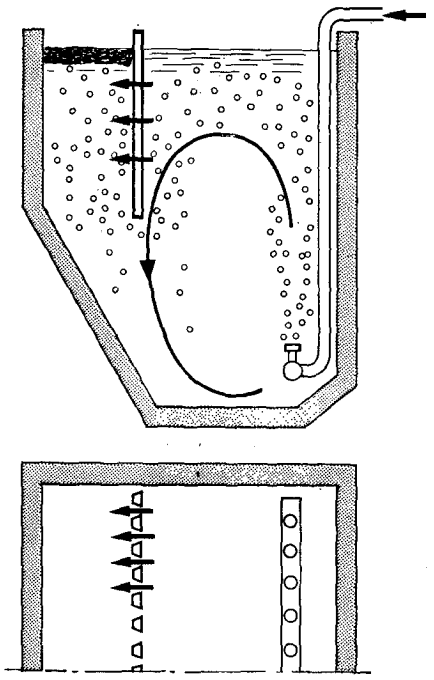


Рис. 7.31

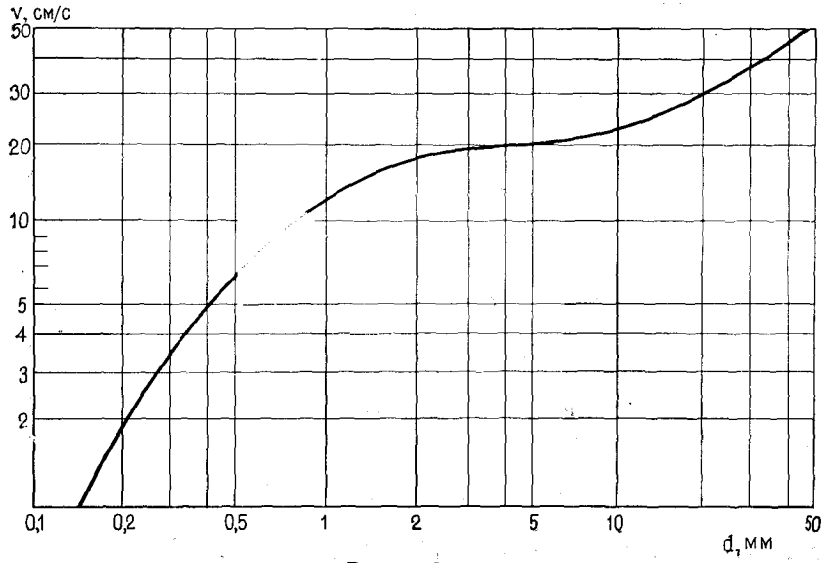


Рис. 7.32

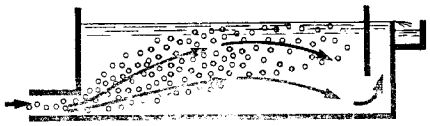


Рис. 7.33

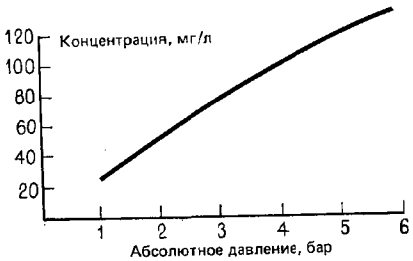


Рис. 7.34

воздуха вверх и при меньшем их диаметре (рис. 7.33).

Для флотатора с определенным поперечным сечением расход воздуха значительно увеличивается при переходе от микропузырьков к пузырькам с размерами в несколько миллиметров при условии достаточно равномерного распределения пузырьков по всему поперечному сечению установки. Но в то же время с увеличением скорости потока воздуха создается турбулентное движение, затрудняющее сепарацию, и осуществляется механическое перемешивание.

Пузырьки обеспечивают эффект флотации только на тот промежуток времени, пока они прилипли к частицам. Обычно предполагается, что диаметр пузырьков меньше диаметра частиц или хлопьев в суспензии.

Процесс флотации, использующий другие средства, чем микропузырьки, может быть использован только в суспензии, содержащей легкие и объемные вещества, поверхность осадков которых не нарушается вихревым движением.

В области очистки воды применяют очень много способов флотации:

отделение флокулированных веществ при осветлении поверхностных вод (вместо отстаивания холодных, низкоминерализованных вод, насыщенных органическими веществами);

отделение флокулированных и нефлокулированных масел, содержащихся в сточной воде нефтеочистительных заводов, аэропортов и сталелитейных заводов;

отделение гидроксидов металлов или пигментов при очистке производственных сточных вод;

уплотнение активного ила (или смеси активного ила и осадка из первичных отстойников), образующегося при обработке органосодержащих сточных вод на очистных сооружениях.

Оборудование следует применять с учетом метода, используемого для образования пузырьков, метода подачи воды во флотатор, формы сооружения и метода сбора пены.

Наиболее широко используемым техническим приемом для получения микропузырьков является нагнетание воздуха в раствор под давлением. Пузырьки образуются в растворе, обо-

гащенном растворенным воздухом под давлением в несколько сот кПа (рис. 7.34). Степень насыщения воздухом воды при различных давлениях при температуре 20° С показана на рис. 7.34. Насыщают воздухом под давлением или сырой сток, или рециркуляционную воду. Количество воды, насыщенной воздухом, составляет только часть расхода воды, поступающей на очистные сооружения; это количество колеблется от 10 до 30% очищаемого расхода воды при давлениях от 0,8 до 0,3 МПа. В среднем около 60% избыточного воздуха растворяется в воде в зависимости от скорости насыщения при атмосферном давлении. Следовательно, потребление сжатого воздуха колеблется от 15 до 50 л на 1 м^3 обработанной воды.

Если количество флотируемых веществ велико и желательно их уплотнить, как в случае с активным илом, то рециркуляционный расход может достигать 200%-ного номинального расхода флотатора. Это возможно при использовании полиэлектролитов и концентрации ила, достигающей 3—6% при удельных нагрузках от 5 до 13 кг по сухому веществу на 1 м^3/ч при нисходящей скорости 2 м/ч.

Электрофлотация — это другой технический прием, целью которого является образование пузырьков газа кислорода и водорода при электролизе воды с помощью соответствующих электродов. Аноды высоко чувствительны к коррозии, а катоды — к накипи при удалении карбонатов. Если необходимо предохранять аноды, то применяют титановую защиту, а если это невозможно, то периодически меняют электроды с целью самоочищения. Может быть также использована предварительная химическая очистка воды или периодическая очистка катодов от накипи.

Плотность тока практически равна 80—90 А/м^2. На 1 м^2 площади поверхности флотатора в 1 ч образуется 50—60 л газа. Скорость потока равна 4 м^3/(ч·м)^2.

Флотацию часто применяют с предварительной флокуляцией; при использовании флокулянтов (см. с. 144). При этом размер хлопьев увеличивается и возрастает площадь поверхности частиц. Это улучшает прилипание пузырьков и увеличивает восходящую скорость движения хлопьев.

Скорости сепарации, или нисходящие скорости потока воды, используемые во флотаторах, изменяются в зависимости от характера очищаемой суспензии и метода получения и распределения микропузырьков.

Для флотаторов на нисходящую скорость и концентрацию флотируемого осадка сильно влияет соотношение:

$$\frac{\text{количество растворенного воздуха.}}{\text{количество флотируемого вещества}}$$

Чем больше это соотношение, тем больше сила, приложенная к частицам и направленная вверх, тем выше нисходящая ско-

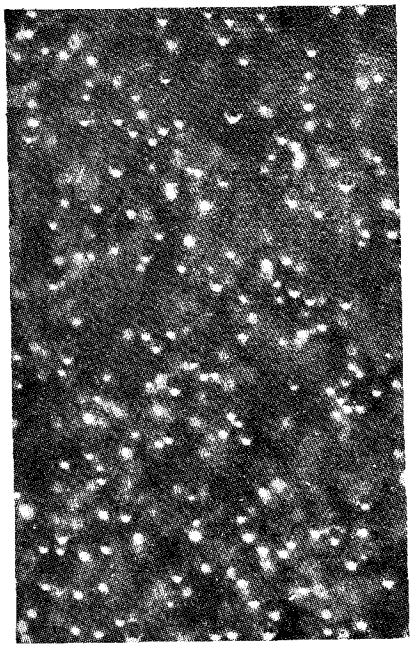


Рис. 7.35. Пузырьки, увеличенные в 30 раз; стесненная дисперсия. Давление 0,5 МПа

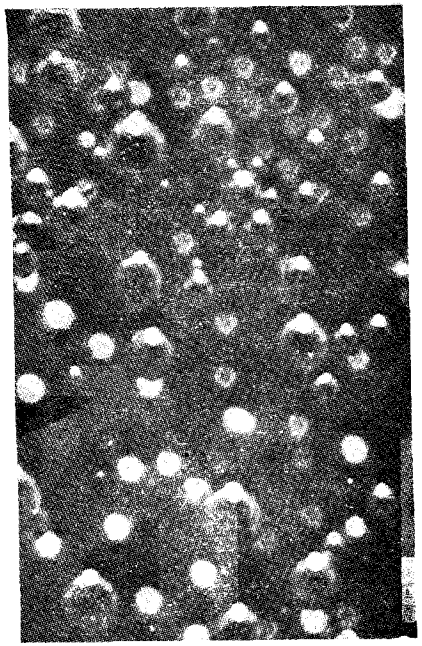


Рис. 7.36. Пузырьки, увеличенные в 30 раз; свободная дисперсия. Давление 0,3 МПа

рость, ниже плотность осадка и больше его концентрация по сухому веществу. Эта скорость не может превышать скорость пузырьков, двигающихся вверх. Как указывалось выше, очень малый размер пузырьков способствует их распределению по всей поверхности и повышает эффективность сепарации, но это может иногда ограничивать скорость прохождения воды через флотатор, а следовательно, и снижать количество очищенной воды на выходе из установки.

В холодных маломинерализованных поверхностных водах, в которых легкие хлопья, естественно, могут быть без труда отделены флотацией, восходящая скорость потока достигает 5—8 м/ч. При отделении нефтепродуктов во флотаторе эта скорость изменяется от 3 до 7 м/ч в соответствии с видом нефтепродуктов и необходимой степенью очистки.

В сточных водах обычно невозможно флотировать все взвешенные вещества. Неизбежно довольно большая часть тяжелых веществ будет накапливаться на дне флотатора. Следовательно, флотаторы должны быть оборудованы системой для удаления осадка со дна сооружения (коническое днище с отвесными стенками или илоскребы).

Различные способы флотации, применяемые в очистке воды, указаны в табл. 7.1.

ТАБЛИЦА 7.1

Способ флотации	Размер пузырьков, мкм	Расход энергии, очищенной Вт/(м³·ч) очищенной воды	Время пребывания, мин	Характер основных удаляемых примесей
С подачей воздуха через пористые материалы	100—500	20—30	2—5	Жиры
Механическая	100—1000	100—200	2—16	«Грубые» полимеры и латексы или полимерные взвеси
Напорная с рециркуляцией 20%	40—70	45—60	20—30	Углеводороды, растворители, волокна, тонкие суспензии, флокулируемые частицы
Электрофлотация	50—70	150—300	—	Те же примеси, что и при напорной флотации, но в случае горячей минерализованной воды

7.4. ФЛОТАТОРЫ

7.4.1. ОБЩАЯ ТЕХНОЛОГИЯ

Флотаторы могут быть круглыми или прямоугольными в плане. Прямоугольные флотаторы обычно используют для очистки питьевой воды. Их конструируют в моноблоке вместе с флокулятором и фильтрами, поэтому они занимают минимальную площадь.

Для изучения процесса флотации рекомендуется провести предварительные исследования (флототест) в лабораторных условиях (рис. 7.37) или в полупроизводственных условиях (см. рис. 7.29). Результаты этих исследований дадут возможность перейти к проектным расчетам, основанным на использовании двух главных параметров: нисходящей скорости и количества флотируемых веществ на единицу площади и в единицу времени.

Невысокая нисходящая скорость, уменьшающая поток частиц в направлении к дну сооружения и теоретически увеличивающая эффективность отделения, также увеличивает время пребывания флотируемого осадка. Это может вызвать деаэрацию флотируемого осадка и разрушение его структуры, что снижает концентрацию осадка. Очевидно, что специалисты должны найти компромиссное решение, обеспечивающее требуемую степень

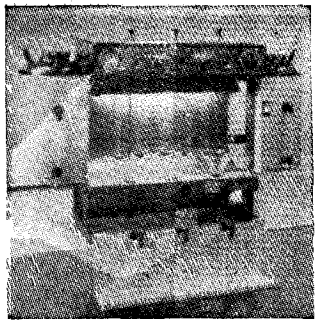


Рис. 7.37. Флототест

уплотнения осадка и эффективность разделения.

Внутренняя конструкция сооружения также значительно влияет на производительность флотатора.

Для распределения пузырьков воздуха круглая форма флотатора предпочтительнее прямоугольной формы. Расстояние между впуском и выпуском воды короче при одинаковых объемах сооружений, и будет поддерживаться почти однородное распределение пузырьков по всему горизонтальному сечению флотатора.

7.4.1.1. Система подачи воды, объединенная с колонной или камерой, несет двойную функцию:

осуществляет взаимный контакт обрабатываемой воды (флокулированной или нет) и воды, находившейся под давлением. Снижение давления следует предусматривать непосредственно перед входом воды в сооружение;

уменьшает кинетическую энергию смеси очищаемой воды и воды, находившейся под давлением, и снижает скорость потока перед введением его в зону флотации.

Камера позволяет ликвидировать большие пузырьки, образовавшиеся в воде при входе во флотатор.

Уровни введения поступающей воды и воды, находившейся под давлением, имеют важное значение при предварительной флокуляции. Меры предосторожности, принимаемые для успокоения смеси, вводимой в зону флотации, учитывают размеры, прочность и плотность флокулируемых и нефлокулируемых веществ, поступающих на флотацию. В случае флотационной обработки питьевой воды или флотации нефтепродуктов с незначительной вязкостью эти уровни следует определять особенно точно.

Водную эмульсию, как правило, вводят в верхнюю половину сооружения. Осадок собирается с открытой поверхности, выпуск осветленной жидкости предусматривают в нижней трети флотатора.

Чем глубже флотатор и чем больше количество выпадающего осадка, тем на большем расстоянии от дна следует забирать осветленную жидкость. Обычно это делается в периферийной камере, ограниченной перегородкой в форме сифона; в некоторых случаях используются затопленные водосливы и лотки.

Более однородное распределение воды и микропузырьков осуществляется в мелких флотаторах (обычно от 2 до 4 м).

7.4.1.2. Образование пузырьков. На рис. 7.38 показаны принципиальные схемы повышения давления и насыщения воздухом воды под давлением (обычно рециркуляционного расхода).

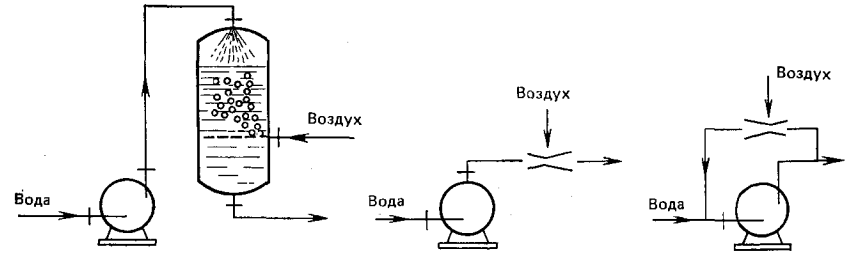


Рис. 7.38.

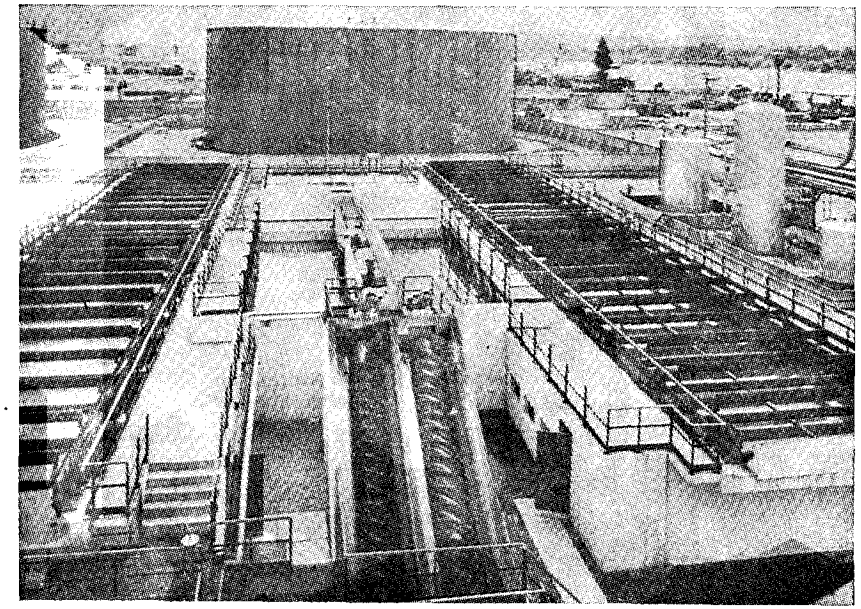


Рис. 7.39. Прямоугольный флотатор производительностью 1800 м³/ч

В некоторых схемах воздух вводится в воду до поступления ее в нагнетательный насос. Системы, включающие амортизирующий сатуратор, более дорогие, но работают очень стабильно. Воздух под давлением может подаваться в напорный трубопровод насоса.

При электрофлотации ряд электродов покрывает площадь поверхности флотатора и подача воды осуществляется выше этой решетки.

7.4.1.3. Сбор и удаление флотошлама. В некоторых случаях слой флотошлама может достигать толщины в несколько сантиметров и становится очень прочным (уплотнение активного

ила). Иногда он тоньше и более хрупкий (флотация хлопьев гидроксидов металлов или нефтепродуктов). Если флотошлам удаляется не полностью, то слой со временем уплотняется и возникающие силы сцепления способствуют прилипанию флотируемых частиц.

Своевременное удаление шлама является серьезной проблемой. Скребковый механизм должен быть достаточно мощным, так как он предназначен для сбора уплотненного шлама.

В круглых флотаторах один или более скребков сгребают флотошлам в радиальный сборный канал длиной, равной половине радиуса. Уклон должен быть принят с таким расчетом, чтобы обеспечить постоянный контакт лезвия скребка с осадком. Число скребков принимается в зависимости от количества флотошлама, скорости его удаления без риска деаэрации и расстояния, на котором флотошлам непрерывно сгребается.

В прямоугольных флотаторах флотошлам сгребается в приямок скребками, приводимыми в движение бесконечной цепью.

Фирма «Дегремон» располагает флотаторами четырех типов.

7.4.2. «ФЛОТАЗЕР В»

Флотатор «Флотазер В» (рис. 7.40) смонтирован на стальной плите диаметром более 6 м. Он имеет один или два поверхностных скребка с центральным приводом. Дно выполнено в форме усеченного конуса, поэтому исключено применение илоскребов. Основной поток воды поступает вертикально в нижнюю часть центральной смесительной камеры, в то время как поток воды, насыщенной растворенным воздухом под давлением, подается тангенциально, выше главного впускного отверстия.

Снижение давления воды осуществляется в две стадии посредством двух специальных задвижек, примыкающих к камере.

Принятая схема сразу обеспечивает тесный контакт флотируемых веществ с микропузырьками. При этом ликвидируется опасность разрушения хлопьев и достигается равномерное распределение потока по всей поверхности сооружения.

Периферийный поверхностный скребок вызывает изменение направления потока и без особых усилий передвигает флотошлам к периферийному бункеру.

7.4.3. «СЕДИФЛОТАЗЕР»

«Седифлотазер» представляет собой круглый флотатор диаметром более 20 м. Гидравлическая схема его в основном та же самая, что и во флотаторе «Флотазер». Он оборудован двумя

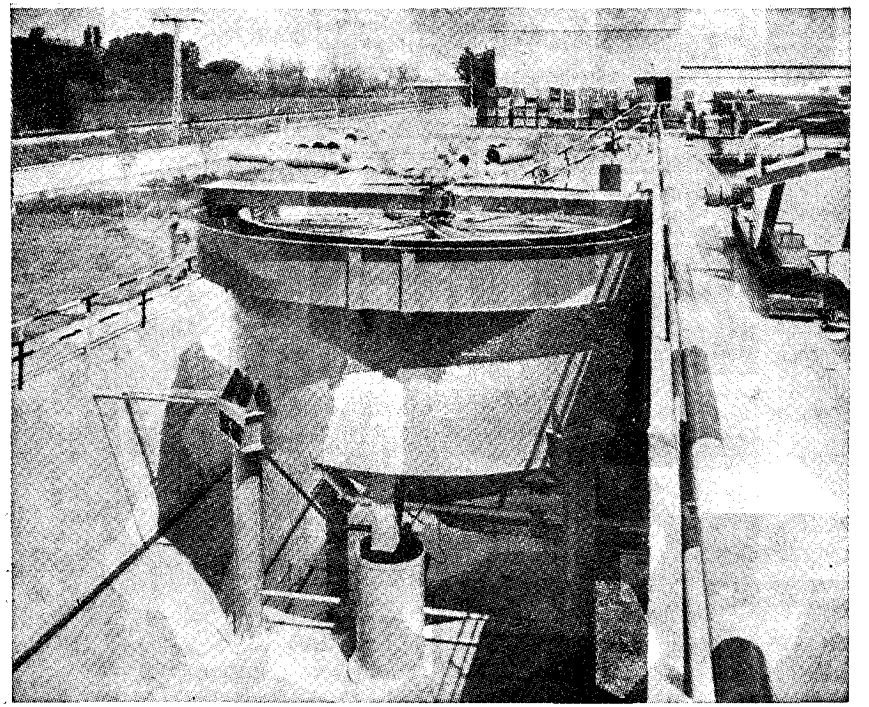


Рис. 7.40. «Флотазер В» диаметром 6 м и производительностью 120 м³/ч

скребками для осадка: один расположен на поверхности воды, другой — на дне сооружения. Это удовлетворяет требованиям очистки воды, в процессе которой образуется как осадок, способный флотироваться, так и осадок, выпадающий на дно.

Донный скребок приводится в движение радиальным мостиком с периферийным приводом тем же самым, которым оборудован статический отстойник (см. с. 168). Вращение радиальных поверхностных скребков (число которых применяют в соответствии с количеством удаляемого осадка и диаметром флотатора) проводится с помощью мостика, к оси которого, шарнирно присоединены рычаги. Другой конец рычага опирается на каток, который двигается по кольцевому рельсовому пути. Ножи скребков, перемещающиеся параллельно поверхности воды, соединены рычагами и имеют на конце ролик, который вступает в контакт с кулачком. Благодаря этому обеспечивается их медленное погружение в воду после прохождения над приемным бункером флотошлама. Образующиеся маленькие водовороты могут нарушать флотируемый взвешенный слой осадка и этого необходимо избегать. Флотошлам поднимается к уровню вы-

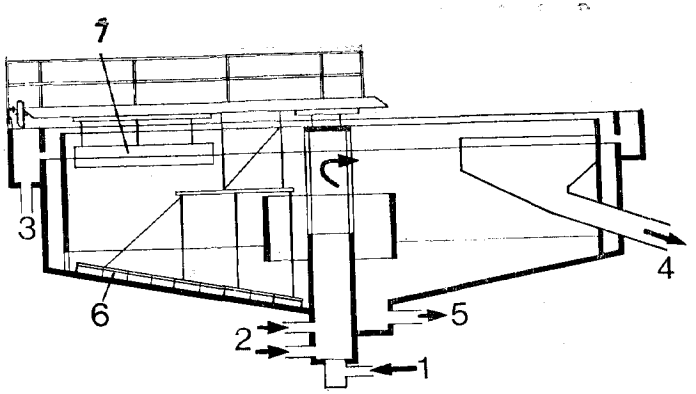


Рис. 7.41. Схема «Седифлотазера»

1 — подача сточной воды; *2* — подача воды, обработанной давлением; *3* — выпуск очищенной воды; *4* — удаление флотошлама; *5* — удаление осадка; *6* — илоскреб; *7* — поверхностный скребок

пуска в бункер, скользя по наклонной плоскости, профиль которой обеспечивает контакт с лезвием скребка.

Сооружения диаметром более 15 м снабжены двумя бункерами для сбора флотошлама, расположенными диаметрально.

7.4.4. «СЕДИФЛОТОР»

«Седифлотор» подобно «Седифлотазеру» оборудован поверхностным скребком, но с центральным приводом. Некоторые конструкции флотатора снабжены илоскребом. Он оборудован переходом и мостиком, позволяющим подойти к центру сооружения, где «Центридег» или подобный ему приводной механизм (см. с. 187) приводит в движение платформу, к которой присоединены илоскребы и поверхностные скребки. Такое оборудование используют при условии, когда необходимо обеспечить зна-

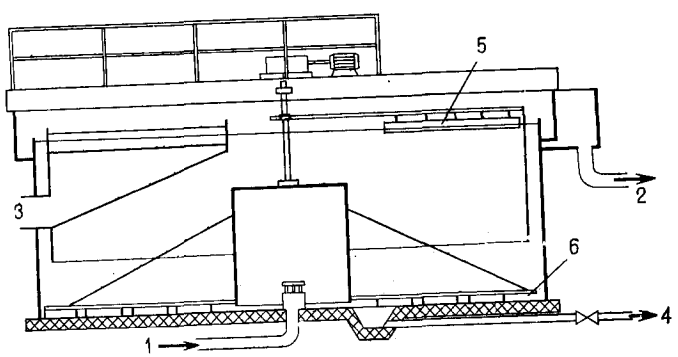


Рис. 7.42. Схема «Седифлотора»:

1 — ввод сточной воды, обработанной давлением; *2* — выпуск очищенной воды; *3* — удаление флотошлама; *4* — удаление осадка; *5* — поверхностный скребок; *6* — илоскреб

чительный вращающий момент для сбора тяжелых оседающих веществ, содержащихся в обрабатываемой воде. Его также применяют в суровых климатических условиях, если возникают трудности при эксплуатации оборудования с периферийным приводом флотатора «Седифлотазер».

7.4.5. «ФЛОТАЗЕР *R*»

В конструкции «Флотазера R» фактически совмещены принцип устройства флокулятора и прямоугольного флотатора. Он особенно пригоден при очистке маломинерализованной питьевой воды с высоким содержанием органических веществ; причем температура этой воды часто бывает низкая; в воде содержатся легкие крупные хлопья; нисходящая скорость принимается равной 5—8 м/ч.

После 15—30-минутного пребывания в отделении флокуляции, которое оборудовано одной или несколькими медленно вращающимися мешалками, вода проходит под перегородкой и поступает в камеру смешения флотатора, где смешивается с водой (насыщенной воздухом под давлением), составляющей 6—15% расчетного расхода. Соответствующее оборудование снижает давление воды, регламентирует образование пузырьков и обеспечивает ее однородное смешение с поступающим сырым стоком по всей ширине сооружения. Ряд поверхностных скребков, приводимых в движение цепями, сдвигают флотошлам по направлению к сборному желобу, расположенному на противоположной стороне от впуска воды в сооружение.

В этом случае образуется немного шлама. Поверхностные скребки периодически удаляют флотошлам с наиболее высокой концентрацией. Он может быть также удален с помощью водослива. Отсутствие осадка, выпадающего на дно, делает ненужным применение илоскребов.

8. АЭРОБНЫЕ БИОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

На первой стадии аэробной биологической очистки сточных вод стимулируется рост бактерий, сосредоточенных в биопленке или хлопьях ила, которые в результате физического и физико-химического взаимодействия извлекают органические примеси и используют их в качестве питания. На второй стадии путем седиментации образующийся ил (называемый биопленкой применительно к биологическим фильтрам) отделяется от воды.

8.1. БИОЛОГИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ

В биологическом фильтре (называемом также капельным или перколяционным) обрабатываемый сток после первичного отстаивания процеживается через толщу материала большой

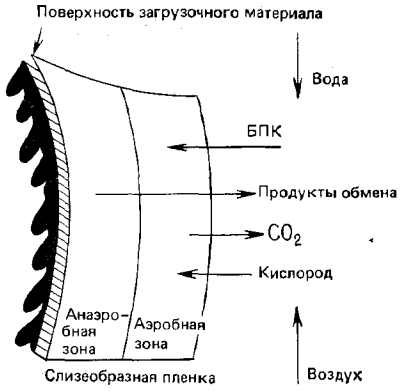


Рис. 8.1

удельной поверхности, заселенной микроорганизмами-чистильщиками, которые образуют на нем войлокообразный слой, или биопленку большей или меньшей толщины. Применяют два типа биологических фильтров, различающихся видом материала загрузки:

обычные биологические, в которых в качестве материала загрузки используют щебень, обожженный шлак или дробленый кремнесодержащий гравий;

биологические с пластмассовой загрузкой.

Независимо от материала загрузки все типы фильтров работают по единому принципу.

Фильтры аэрируются в большинстве случаев вследствие естественной тяги и реже путем принудительной вентиляции. Цель аэрации — обеспечить весь объем фильтра требуемым количеством кислорода для поддержания микрофлоры в состоянии аэробиоза.

Загрязнения из стока и кислород из воздуха проникают через биопленку и ассимилируются микроорганизмами, а в противоположном направлении выделяются продукты обмена в воду и диоксид углерода в газовую фазу (рис. 8.1). В соответствии с толщиной пленки под аэробным слоем может развиваться анаэробный слой.

Биопленка, или слизь состоит из гетеротрофных бактерий, которые обычно сосредоточиваются вблизи поверхности фильтра, и автотрофных (нитрифицирующих) бактерий у его дна. Грибы (Fusarium, Oospora, Geotricium) часто обнаруживают в верхних слоях, а зеленые водоросли — на поверхности.

Обычно в изобилии встречаются хищные представители фауны, такие, как протозоа, и наиболее развитые виды — черви, личинки насекомых, пауки и слизни.

8.1.1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ

Снижение БПК в биофильтрах зависит от природы обрабатываемого стока, гидравлической нагрузки, температуры и типа загрузки фильтра. Математическое описание основывается на предположении, что микроорганизмы находятся в фазе замедления роста:

$$L_f/L_0 = e^{-k_1 t} \qquad (8.4)$$

где L_f — БПК очищенной воды; L_0 — БПК воды, поступающей на фильтр; t — средняя длительность пребывания воды в биофильтрах; k_1 — константа, зависящая от температуры воды, вида загрузочного материала, природы исходного стока.

Исследования, в частности, с использованием радиоактивных трасеров показали, что длительность пребывания t воды в биофильтре подчиняется закону нормального распределения и что ее среднее значение может быть представлено в виде:

$$t = k_2 \frac{H}{Q^n}, \qquad (8.2)$$

где H — высота фильтра, м; Q — гидравлическая нагрузка, м³/(м²·сут); k_2 и n — константы.

Отсюда

$$L_f/L_0 \simeq e^{-k_1 k_2 HQ^{-n}}. \qquad (8.3)$$

По исследованиям Эккенфельдера и Бернхарта

$$k_1 k_2 = k_T S_s^m, \qquad (8.4)$$

где k_T — коэффициент, зависящий от температуры и вида загрузки; S_s — удельная площадь поверхности этой загрузки, м²/м³; m — положительный показатель степени меньше единицы, определяемый опытным путем.

Отсюда окончательное выражение принимает вид:

$$L_f/L_0 = e^{-k_T S_s^m HQ^{-n}}.$$

8.1.2. БИОФИЛЬТРЫ С ОБЫЧНОЙ ЗАГРУЗКОЙ

В таких биофильтрах при высоте слоя загрузки 2 м эффективность очистки относительно низкая (66%), если нагрузка по БПК (выраженная в кг БПК на 1 м³ объема загрузки в сутки) высокая. В этом случае эффективность может быть увеличена путем рециркуляции потока с биофильтра обратно на биофильтр, благодаря чему обеспечивается разбавление исходной воды.

Для расчета L_f в случае очистки бытовых сточных вод предложены эмпирические уравнения. Например, Рэнкин дает выражение, основанное на максимальной гидравлической нагрузке 1,13 м³/(м²·ч) (включая рециркуляцию):

для одноступенчатых биофильтров:

$$L_f = L_0/(2r + 3).$$

для двухступенчатых биофильтров

$$L_{f1} = 0{,}5L_0$$

$$L_{f2} = L_{f1}/(2r + 2),$$

где r — рециркуляционное отношение.

В зависимости от нагрузки по БПК различают низко- и высокоскоростные фильтры, которые при очистке бытовых сточных вод характеризуются следующими эксплуатационными нормами:

	Низкоскоростные	*Высокоскоростные*
кг БПК/(м³·сут) (городские сточные воды)	0,08—0,15	0,7—0,8
Гидравлическая нагрузка, м³/(м²·ч)	<0,4	>0,7

Для высокоскоростных фильтров обычно требуется рециркуляция, в результате которой гидравлическая нагрузка обеспечивает однородность бактериальной флоры на различных уровнях. Происходит самоочищение материала загрузки, вследствие чего остается лишь тонкая активная пленка, которая обеспечивает быстрое протекание процесса и облегчает последующую задачу разрушения образующегося клеточного материала. Процессы минерализации (стабилизации) проводятся на очистных сооружениях на другой стадии, такой как анаэробное сбраживание, которая непременно включает использование конечного осветлителя после фильтра для сбора оседающего осадка и передачи его на сооружения обработки осадка.

В высокоскоростных фильтрах активность хищных организмов ограничена.

В низкоскоростных фильтрах отсутствует непрерывная промывка биопленки, что создает условия для ее накапливания. Деятельность хищных организмов играет существенную роль, в совокупности с эндогенной респирацией она ограничивает развитие пленки. В низкоскоростных фильтрах биопленка сильно минерализована и может быть удалена без отстаивания, если допускается периодический выброс ее с очищенной водой. Поскольку риск забивания фильтра велик, низкоскоростные фильтры, неэкономичные, несмотря на их высокую эффективность (95%), используются все реже и реже и заменяются высокоскоростными фильтрами с рециркуляцией.

Применение рециркуляции позволяет автоматически промывать биопленку, засевать (бактериями) сток из первичных отстойников и разбавлять воду с высокой БПК. Рециркуляцию можно осуществить несколькими способами (рис. 8.2).

Наиболее часто в рециркуляционных системах используют следующий метод. Непрерывному возврату подвергается биопленка, поскольку рециркуляционный поток забирается из донной части конечного осветлителя; площадь поверхности последнего может быть рассчитана на восходящую скорость только обрабатываемого расхода Q. С другой стороны, первичный отстойник должен рассчитываться на расход $Q\,(1+R)$.

В биофильтрах с обычной загрузкой используют щебень, обожженный шлак или дробленый кремнесодержащий гравий.

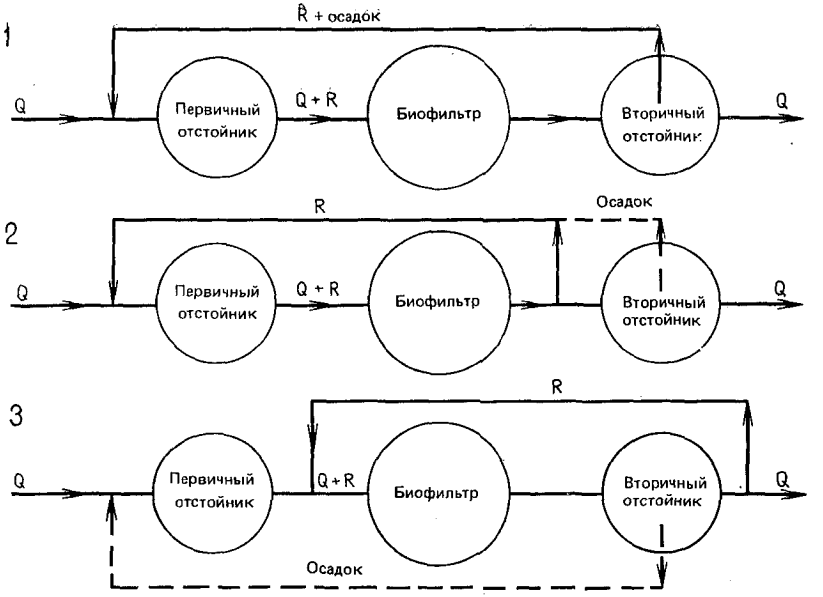


Рис. 8.2

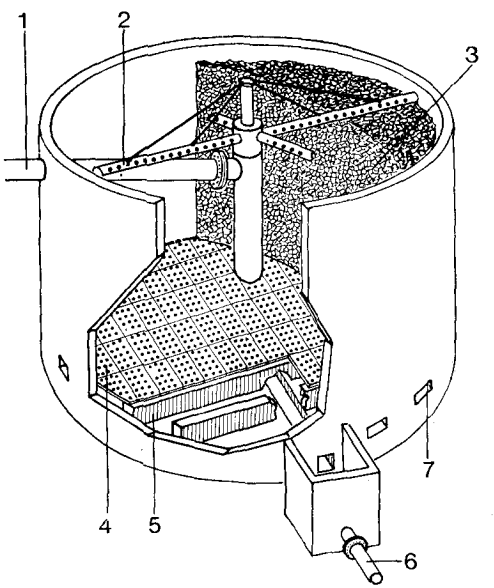


Рис. 8.3. Разрез биофильтра:
1 — впуск; *2* — спринклер; *3* — фильтрующий материал; *4* — перфорированная плита; *5* — поддерживающая плита; *6* — обработанный сток; *7* — подача воздуха

Следует применять очищенный и нехрупкий материал с постоянным размером гранул (40—80 мм).

Каменистая загрузка имеет свободное пространство, равное 0,5, что означает, что для биопленки допускается объем 0,35 м³/м³ загрузки, а свободное пространство для аэрации ог-

раничено величиной 0,15. Это определяет предел развития биомассы при увеличении нагрузки.

Независимо от вида материала, использованного для загрузки, вода перед фильтром должна подвергаться первичному отстаиванию, чтобы устранить опасность забивания фильтра взвесью сырого стока.

8.1.3. БИОФИЛЬТРЫ С ПЛАСТМАССОВОЙ ЗАГРУЗКОЙ

Процессы с активным илом уже давно использовались для очистки стоков с высокой БПК в таких производствах, как агротехнические и пищевые. Биофильтры с обычной загрузкой в этих случаях используют мало, если имеется риск чрезмерного разрастания биопленки и забивания фильтра.

Однако биофильтры имеют ряд преимуществ перед средне- и высокоскоростной обработкой с активным илом: они менее чувствительны к внезапному изменению нагрузки; легко эксплуатируются; требуют значительно меньше энергии, поскольку чаще всего воздух поступает в биофильтр естественным путем. С учетом этих преимуществ усилия были направлены к изысканию новых материалов загрузки, которые уменьшили бы опасность заиливания фильтра. В 1960 г. появились биофильтры с пластмассовой загрузкой.

Фильтры с пластмассовой загрузкой значительно отличаются от обычных. Они менее подвержены заиливанию и могут быть использованы при высоких нагрузках по БПК в пределах 1—5 кг $БПК_5$ на 1 $м^3$ объема в сутки.

Поскольку используется более дорогой материал загрузки, чем в обычных биофильтрах, очень важно обеспечить оптимальное соотношение

$$\frac{\text{снятая } БПК_5 \text{ за сутки}}{\text{объем фильтра}}.$$

По этим двум причинам биофильтры с пластмассовой загрузкой обычно используют при высоких скоростях. При этих условиях эффективность снижения БПК невелика (30—70% в зависимости от вида обрабатываемого стока и нагрузки по БПК) и может не соответствовать существующим требованиям. В случае необходимости в дополнение к биофильтрам с пластмассовой загрузкой применяют стадию обычной обработки, главным образом, с активным илом.

Уравнение (8.3) показывает, что эффективность работы биофильтра возрастает с увеличением высоты слоя загрузочного материала. Практически она редко превышает 7 м, так как обусловлена прочностью используемых материалов и их стоимостью. Применение пластмассовой загрузки, имеющей определенную геометрическую форму, обеспечивает создание самоподдерживающего типа фильтра, которому не требуются стенки для выдерживания высоких механических нагрузок.

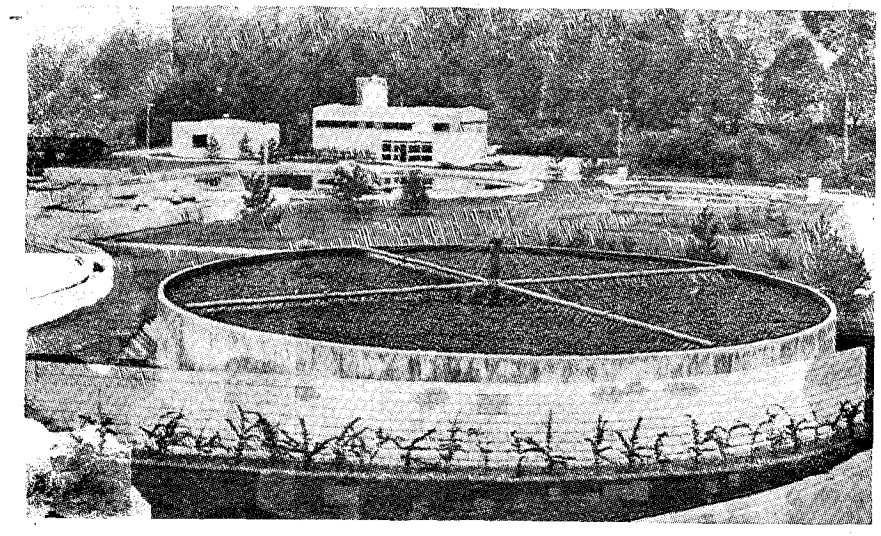


Рис. 8.4. Биофильтр с обычной загрузкой

Фильтры с пластмассовой загрузкой обычно используют при обработке концентрированных стоков, поэтому должна быть предусмотрена рециркуляция, чтобы поддержать минимальную гидравлическую нагрузку, ниже которой нельзя получить требуемого самоочищающего действия.

В зависимости от типа используемого материала эта гидравлическая нагрузка колеблется от 1,5 до 3 $м^3/(м^2 \cdot ч)$. В отличие от фильтров с обычной загрузкой рециркуляция здесь не увеличивает эффективности снижения $БПК_5$.

Сток для рециркуляции может быть взят либо со дна биофильтра, либо после вторичного отстойника. Первый вариант лучше, поскольку в этом случае не нужно увеличивать размеры вторичного отстойника, чтобы обеспечить отстаивание рециркулирующего расхода в дополнение к исходному. Рециркуляция части продуцируемой избыточной пленки на фильтр не влечет потери эффективности и не вызывает заиливания.

Должны быть предусмотрены устройства для непрерывного орошения биофильтра при необходимости с использованием рециркуляции жидкости из конечного осветлителя, если расход обрабатываемого стока недостаточен или временами прекращается вовсе. Это важно, главным образом, например, в уикенд или в другое время, когда поступление стока резко уменьшается или когда закрываются некоторые промышленные предприятия.

● *Промежуточный отстойник перед обработкой с активным*

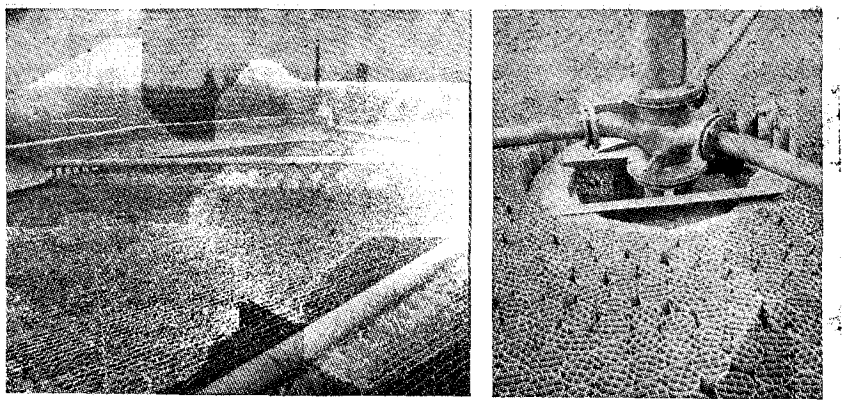


Рис. 8.5. Биофильтры с пластмассовой загрузкой

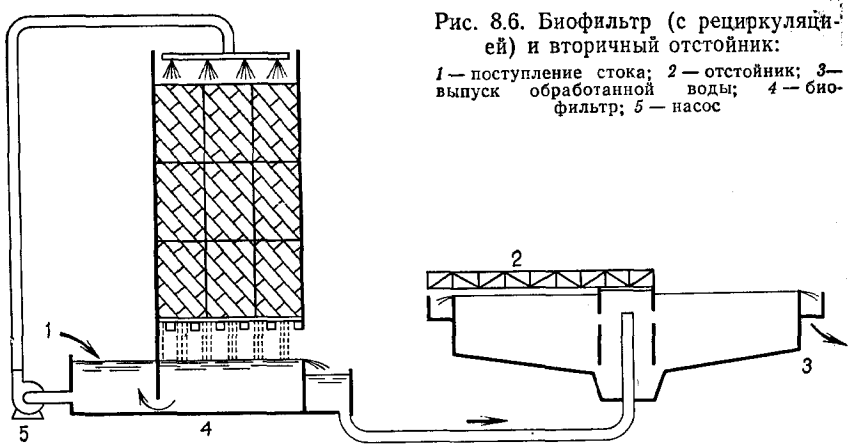


Рис. 8.6. Биофильтр (с рециркуляцией) и вторичный отстойник:
1 — поступление стока; *2* — отстойник; *3* — выпуск обработанной воды; *4* — биофильтр; *5* — насос

илом. Биофильтры с пластмассовой загрузкой часто работают на воде без первичного отстаивания. Так как на этих фильтрах происходит частичная флокуляция растворенных веществ, содержащихся в исходной сточной воде, значительное количество осадка можно задержать в промежуточном отстойнике. Избыток циклически образующейся на фильтре биопленки, способной к ферментации и неминерализованной, удаляется из этого сооружения и, следовательно, не увеличивает потребности в кислороде в последующей фазе обработки (с активным илом).

Поскольку избыточная пленка с биофильтров оседает чрезвычайно быстро, размеры отстойника определяются из восходящей скорости 1,5—2,5 м/ч.

●*Материалы для пластмассовой загрузки* обладают высокой удельной площадью поверхности (обычно в пределах 90—300 $м^2/м^3$) и высоким показателем свободного пространства

(около 95%). Применяются два основных типа загрузки: насыпная (или беспорядочная) и геометрическая. Насыпная загрузка подвержена заиливанию больше, чем геометрическая и используется главным образом для малозагрязненных стоков, не содержащих взвешенных веществ.

8.1.4. ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЛУАТАЦИИ БИОФИЛЬТРОВ

Защита от холода. Биофильтры с пластмассовой загрузкой ведут себя подобно градирням, температура в которых заметно падает, в особенности зимой. К тому же активность микроорганизмов в биофильтре оказывается более подверженной действию холода, чем биомасса в аэротенках. Это происходит из-за высоких скоростей протекания жидкости в биофильтрах. В условиях холодного климата потери тепла в биофильтрах предпочтительно ограничить устройством двойных стенок и крыши при контроле вентиляции и т. п.

Защита окружающей среды. При обработке некоторых стоков (от пивоваренных, винокуренных заводов и т. д.) в биофильтрах иногда образуются газы с относительно интенсивными запахами. Может оказаться необходимым закрыть фильтр и дезодорировать его продувкой воздухом. Постоянную серьезную проблему могут представлять мушки (Psychoda), развивающиеся на фильтре (безотносительно к материалу загрузки — летом). Чтобы исключить это заражение, которое затрагивает поверхность фильтра, важно обеспечивать постоянное орошение всей поверхности.

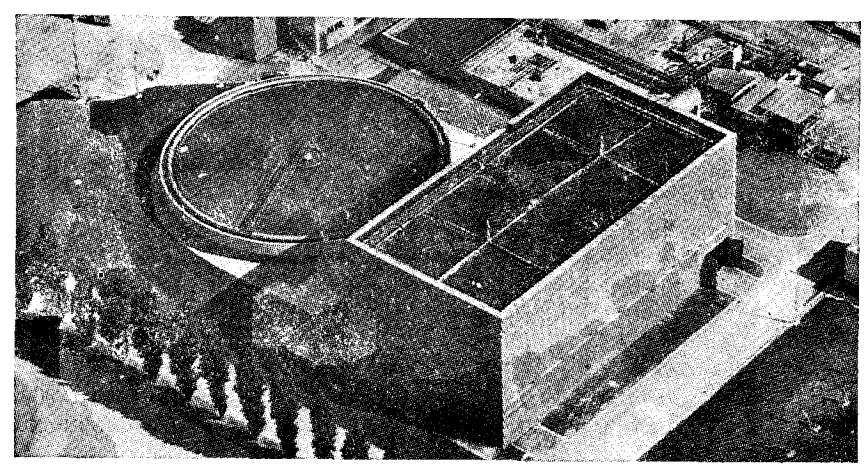


Рис. 8.7. Биофильтр с пластмассовой загрузкой и отстойник (Кроненбургский пивоваренный завод, Обернэ, Франция)

8.2. ПРОЦЕССЫ ОЧИСТКИ ВОДЫ С АКТИВНЫМ ИЛОМ

В этих процессах рост бактериальной культуры в форме хлопка (активный ил) осуществляется при перемешивании в аэрируемом сооружении, в который подается очищаемый сток.

Перемешивание предотвращает образование застойных зон в аэротенке и гомогенизирует смесь бактериальных хлопьев и стока (смешанной жидкости); путем аэрации растворенный кислород поставляется или из атмосферного воздуха или из воздуха, обогащенного кислородом или даже из чистого кислорода, обеспечивая в смеси потребности аэробных бактерий.

После достаточного по длительности контакта смешанная жидкость поступает в конечный осветлитель или же во вторичный отстойник, в котором очищенный сток отделяется от ила. Ил возвращается в аэротенк, чтобы обеспечить в нем достаточную концентрацию бактерий-очистителей. Избыток (избыточный активный ил) удаляется из системы и поступает в сооружения обработки осадка.

8.2.1. НАГРУЗКА

Различные типы обработки с активным илом классифицируются в соответствии с нагрузкой на него C_m, которая дает примерное представление о соотношении суточной массы поступающих загрязнений и массы бактерий (см. с. 105 и рис. 8.9). Применяют следующие системы:

высоконагружаемые при $C_m > 0{,}5$ кг $БПК_5$ в сутки на кг ила
средненагружаемые $0{,}2 < C_m < 0{,}5$;
низконагружаемые $0{,}07 < C_m < 0{,}2$;
очень низконагружаемые,
или продленной аэрации: $C_m < 0{,}07$.

Термин «продленная аэрация» предпочтительнее термина «полное окисление», ибо последнее предполагает полное превращение всех органических веществ в газ и нерастворенные неорганические вещества и, следовательно, полное отсутствие избыточного ила, чего в действительности никогда не наблюдается.

При нагрузках на ил ниже 0,1—0,4 может иметь место нитрификация, развитие которой зависит от температуры воды и pH (см. с. 111).

Понятие нагрузки по БПК C_v на 1 м³ сооружения (с. 105), хотя и в меньшей степени характеризует процесс, используется довольно часто.

Обычно принимаются следующие значения в зависимости от степени предварительной чистки и концентрации ила в смешанной жидкости:

высокая нагрузка по БПК: $C_v > 1{,}5$ кг $БПК_5$ в сутки
аэротенка;
средняя нагрузка по БПК: $0{,}6 < C_v < 1{,}5$;
низкая нагрузка по БПК: $0{,}35 < C_v < 0{,}6$;
продленная аэрация: $C_v < 0{,}35$.

м³ объема

Очистка в аэрируемых лагунах — процесс дл ельный, проходящий при нагрузке по БПК менее 0,1 и низко и меняющейся концентрации ила, без рециркуляции ила из оричного отстойника. По этой причине, несмотря на длитель е время пребывания, нагрузка на ил может оказаться высоко

Для всех систем обработки с илом нагрузи на ил — это параметр, который определяет эффективность ж жения БПК

Рис. 8.8. Изменение параметров очистки как функции нагрузки на ил C_m

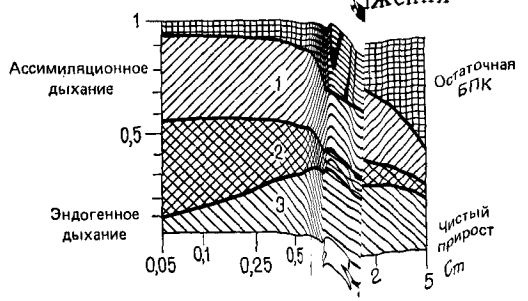
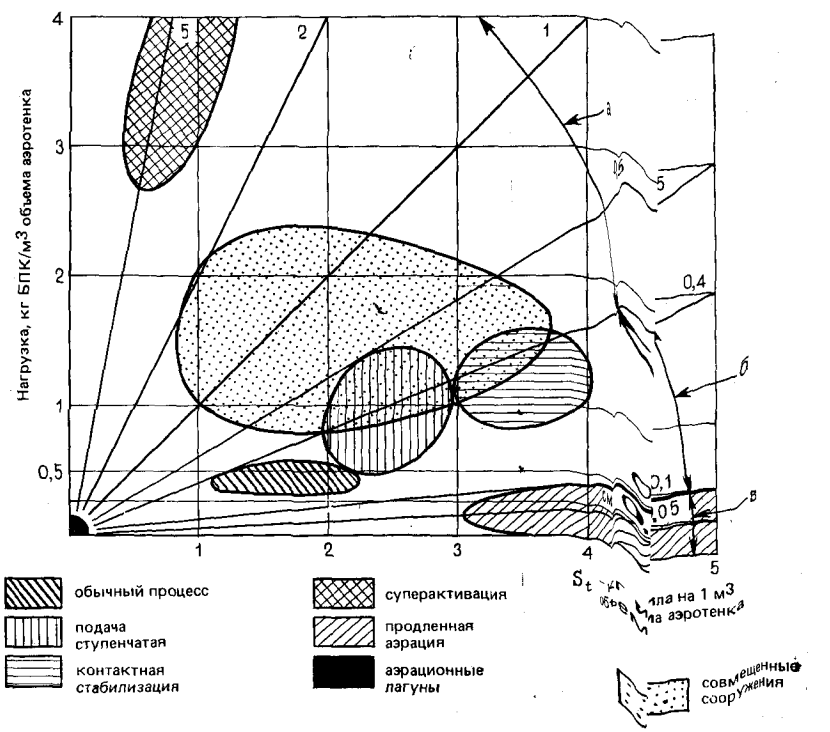


Рис. 8.9. Нагрузка для различных систем с активным илом
а — высокая; *б* — средняя; *в* — низкая



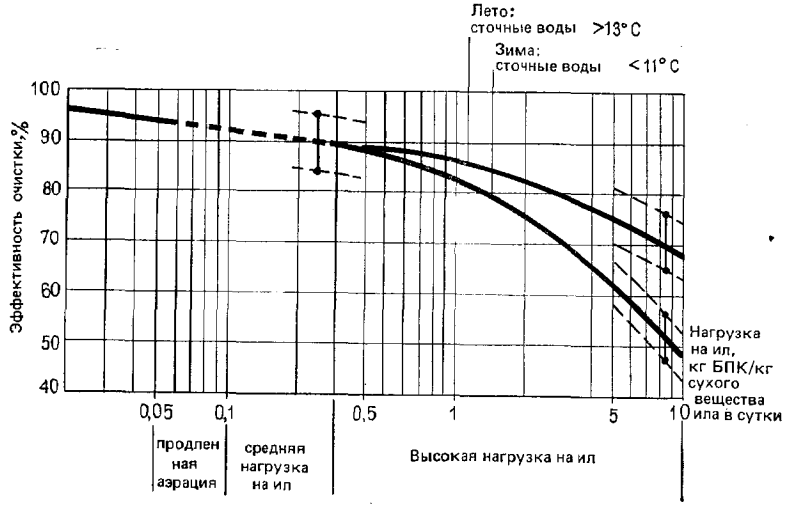


Рис. 8.10. Эксперименты Вурмана со сточной водой Цюриха (90<БПК<150 мг/л)

(см. рис. 8.8, кривая *1*), общий прирост клеток, синтезированных из биоразлагаемых загрязнений (кривая *2*) и чистый прирост, учитывающий внутриклеточные катаболические реакции эндогенного окисления (кривая *3*).

Для бытовых сточных вод со средним уровнем загрязнения (150<БПК<350 мг/л), не содержащих промышленных стоков, может быть достигнута примерно следующая эффективность очистки по БПК (при наличии первичного осветления):

продленная аэрация и низкая нагрузка на ил . . . . . —95%;
средняя нагрузка . . . . . —90%;
высокая нагрузка . . . . . —85%.

Если $БПК_5$ бытовых сточных вод выходит за указанные пределы или в них содержатся промышленные стоки, то вариации эффективности в зависимости от нагрузки могут оказаться иными. В таких случаях лучше всего построить график по результатам эксперимента применительно к изучаемому стоку, чтобы иметь возможность рассчитать сооружения в точном соответствии с желаемой степенью эффективности.

Никогда не следует забывать, что эффективность любого процесса очистки зависит не только от биологической активности в аэротенке, но и от эффективности процесса вторичного отстаивания, посредством которого биологические хлопья отделяются от воды.

Значение допустимой нагрузки по БПК на аэрационные сооружения зависит от вида и расположения оборудования, с помощью которого подается обрабатываемая вода, от системы подачи требуемого количества воздуха и циркуляции ила.

8.2.2.1. Раздельные сооружения. В этих системах аэрация и вторичное отстаивание проходят в двух разных сооружениях, а рециркуляционный ил насосами перекачивается из отстойника в аэротенк (рис. 8.11).

В обычных системах, называемых вытеснителями, обрабатываемый сток Q и активный ил R вводятся одновременно с верхнего конца длинной стороны аэротенка.

Преимущества данной системы заключаются в том, что она обеспечивает отличное качество воды и способствует прохождению нитрификации. Однако при этом возрастает потребление кислорода в начале аэротенка, поскольку все количество загрязнений вводится в одной точке. Этот недостаток может быть устранен ступенчатой подачей, неправильно называемой ступенчатой аэрацией, при которой обрабатываемый сток рассредоточивается по длине аэрационного коридора, а весь возвратный ил перекачивается в начало аэротенка (рис. 8.11). В данном случае общая масса ила больше, чем в вытеснителе, при одинаковой концентрации его на выходе. Концентрация ила уменьшается от начала к концу сооружения. Преимущество этого процесса состоит в том, что рециркуляционный ил реаэрируется до того, как он приходит в контакт с обрабатываемым стоком.

Такая система использована фирмой «Дегремон» на ряде крупных станций в различных городах (Женева, Метц, Тур, Монпелье, Лимож и другие), где каждый аэротенк имеет несколько коридоров, расположенных рядом друг с другом, но работающих последовательно (распределение воды в аэротенке со ступенчатой подачей показано на рис. 8.33).

Эти принципы нашли дальнейшее развитие в процессе так называемой контактной стабилизации и ее производных, в которых отстоенный ил вводится только после достаточной его реактивации. В течение относительно короткого времени контакта активного ила с вводимым стоком органические вещества удаляются либо абсорбцией, либо адсорбцией на хлопке ила (биосорбционный процесс «Инфилко — Дегремон»).

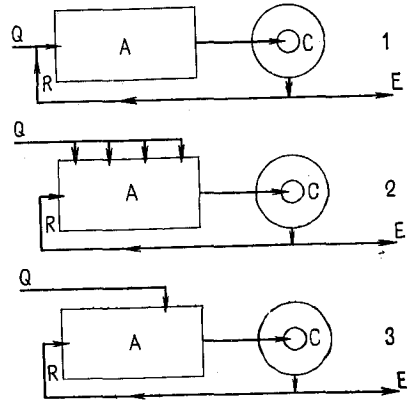


Рис. 8.11. Схемы подачи воды в аэротенки:
1 — обычный тип; *2* — ступенчатая подача; *3* — биосорбция
A — аэротенк; *C* — вторичный отстойник; *E* — избыточный ил; *Q* — сырая сточная вода или сточная вода после первичного отстаивания; *R* — возвратный ил

Ступенчатая подача и биосорбция — это процессы со средней нагрузкой на ил.

Полное смещение — третий вариант, при котором в любой точке аэротенка находится в одинаковой пропорции обрабатываемый сток, активный ил и кислород, т. е. обеспечивается одинаковая нагрузка на ил. Эта система имеет наибольшую устойчивость к шоковым нагрузкам по сравнению с системами, описанными выше, но менее благоприятна для нитрификации. Ее трудно осуществить в аэротенках раздельного типа большого объема, в особенности в аэротенках прямоугольной формы, но она хорошо осуществима в совмещенных сооружениях («Миниблок», см. с. 762, МА «совмещенное сооружение, с. 760 и «Оксирапид» и «Аэроакселатор», описанные ниже).

8.2.2.2. «Оксирапид». Сооружение «Оксирапид» — это совмещенная конструкция, включающая как аэрационное, так и отстойное отделения, где скорость возврата ила может быть очень высокой. Они могут работать без какого-либо подвижного надводного механического оборудования. Длина труб возвратного ила назначается минимальной.

В этих сооружениях достигается полное смешение. Они экономичны для крупных станций и обеспечивают высоко эффективную очистку при высокой нагрузке на ил; вместе с тем они настолько компактны, что экономится значительная площадь по сравнению с требуемой для раздельных сооружений. «Оксирапид» пригоден для обработки сточных вод при населении от 50 тыс. до 250 тыс. человек.

Помимо чисто биологических преимуществ полного смешения эти сооружения обладают преимуществами отстойника с вертикальным движением воды через взвешенный слой ила: здесь имеется возможность изменять рециркуляционный расход вручную или автоматически до 300%.

«Оксирапид» строится либо круглым, либо прямоугольным в плане; последняя конфигурация, которая для крупных станций наиболее удобна, имеет центрально расположенную аэрационную зону, окруженную с обеих сторон (или в некоторых конструкциях с одной стороны) зонами вторичного отстаивания. Конструкция легко монтируется из отдельных частей, изготовленных заводским путем. Это высокопроизводительное сооружение может обрабатывать неотстоенную воду, если, однако, она пропущена через тонкие решетки.

Отстоявшийся ил возвращается в аэрационную зону через подъемные рециркуляционные трубы с диффузорами, которые обеспечивают необходимое давление воздуха для этого процесса.

Воздух для рециркуляции ила забирается отдельным отводом из основной системы таким образом, что количество возвратного ила может быть легко изменено, и это не влияет на расход воздуха, вводимый в собственно аэрационную часть.

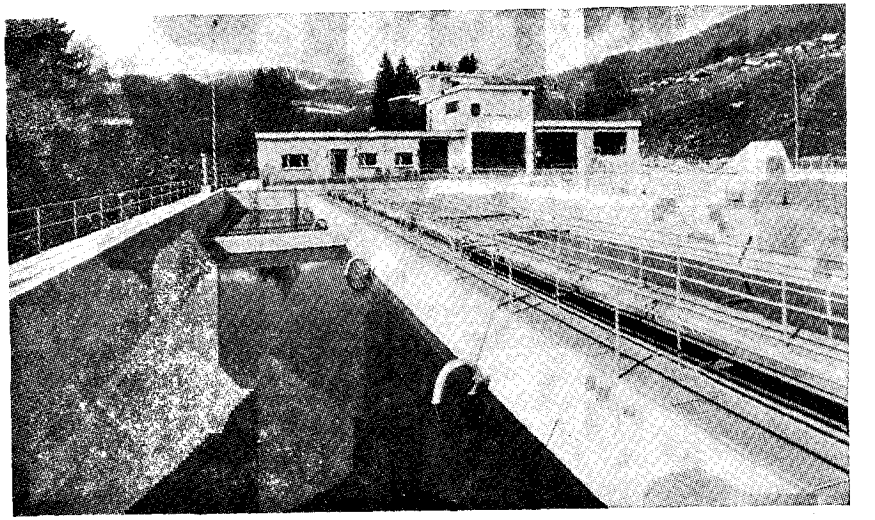


Рис. 8.12. Четыре сооружения Оксирапид на очистной станции Флимс (Швейцария)

В зависимости от условий эксплуатации автоматически может быть запрограммирован режим возврата ила — непрерывный или периодический.

Особое внимание уделено распределению и медленному впуску смешанной жидкости в отстойную зону, при этом может быть достигнута высокая восходящая скорость и максимально использованы преимущества эффекта фильтрования через взвешенный слой ила.

Угол наклона стенок обычно составляет 50—55°. Существующие конструкции оксирапида имеют длину 10—120 м.

«Оксирапид» типа S400 и S450, принципиальное устройство которых описано выше, имеют две стандартных глубины: 4 и 4,5 м.

У «Оксирапида» типа *L* (оксифляш) отстойное отделение заполнено погружными наклонными пластинами, обеспечивающими осаждение в ламинарном режиме (см. с. 79), что позволяет увеличить среднюю скорость осаждения на 50—70%. Если при эксплуатации поступающий расход превышает производительность сооружения типа *S*, то установка этих плит существенно улучшает условия работы.

«Оксирапид» типа R проектируется для обработки низкоконцентрированных вод, но с высокой степенью неравномерности расхода. В сооружении увеличена площадь зоны отстаивания по сравнению с «Оксирапидом» типа *S* той же длины и того же объема; оно имеет скребковый механизм, обеспечивающий сползание ила по несколько наклонным стенкам в зоне отстаивания.

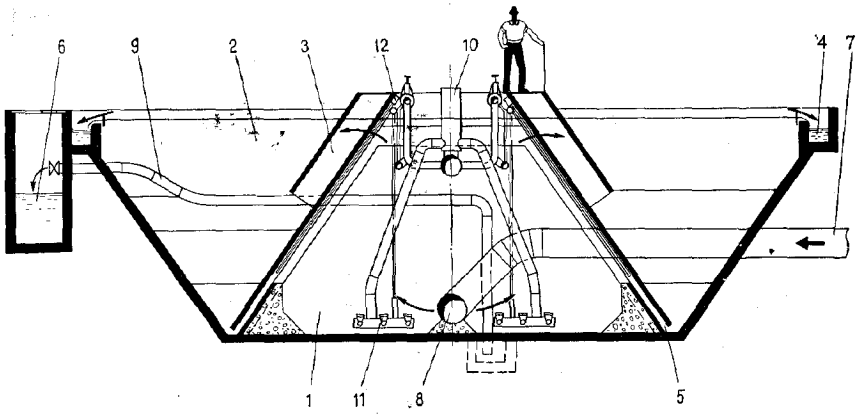


Рис. 8.13. Схема оксирапида

1 — зона аэрации; *2* — зона отстаивания; *3* — перепускной лоток; *4* — выпуск обработанной воды; *5* — лоток для перепуска возвратного ила; *6* — канал избыточного ила; *7* — впуск сырой воды; *8* — перфорированная труба для распределения сырой сточной воды; *9* — трубопровод избыточного ила; *10* — воздухопровод; *11* — диффузор; *12* — воздух для эрлифта

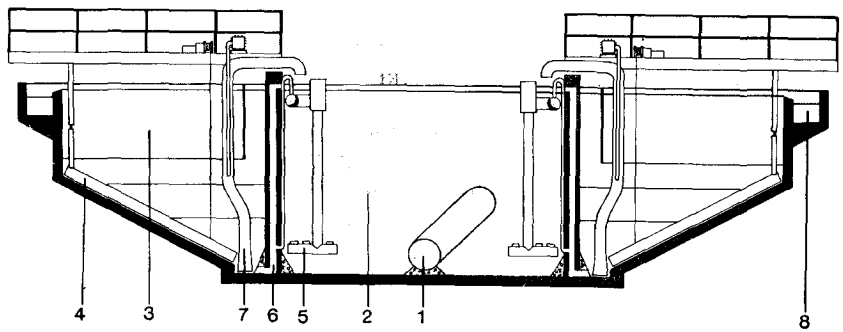


Рис. 8.14. Схема Оксирапида типа *R* со скребками

1 — впуск сырой сточной воды; *2* — зона аэрации; *3* — зона отстаивания; *4* — скребковое устройство; *5* — воздух; *6* — рециркуляция ила; *7* — всасывание избыточного ила; *8* — выпуск обработанной воды

«Оксирапид» проектируют таким образом, чтобы он был объединен с первичным отстойником, образуя простое высококомпактное очистное сооружение, прямоугольное либо круглое в плане. Такой комплекс, например, если он расположен внутри города, легко полностью закрыть.

«Оксирапид» оборудуют среднепузырчатыми (Вибрейр) или мелкопузырчатыми (ДР 230 пористые диски) диффузорами.

Обрабатываемый сток подается либо в центр сооружения по всей длине, либо продольным открытым каналом, который оборудуют водосливами, или же погружными трубами с отверстиями, расположенными через определенные интервалы. Продольное сооружение имеет ряд выпусков для сточной воды по всей

длине сооружения; в некоторых случаях они оборудованы распределительными сифонами.

Избыточный активный ил удаляется либо с помощью гидростатического эжектора, либо с помощью эрлифта; удаление всегда автоматизировано (диафрагменный или соленоидный клапан). Место, откуда забирается ил, обычно предусматривается у дна отстойной зоны, но может быть и в аэрационной зоне, если это необходимо.

Эксперименты показали, что если места отбора ила удалены друг от друга, то концентрация ила в зоне аэрации различается в пределах $\pm 10\%$ по всей длине сооружения.

8.2.2.3. «Аэроакселатор» — сооружение совмещенного типа «Инфилко-Дегремон» (в плане имеет круглую форму) с центральной зоной аэрации и периферийной зоной отстаивания; возврат ила (из нижней точки сооружения, находящейся в зоне аэрации) ускоряется регулированием рециркуляционного расхода. Смесь в зоне аэрации насыщается кислородом и перемешивается аэратором «Вортимикс» (см. с. 229).

8.2.2.4. Функции вторичного отстойника. В раздельных системах обработанная вода отделяется от ила во вторичных отстойниках, называемых иногда также конечными осветлителями. Основная задача при проектировании отстойников — создать такую конструкцию, в которой ил находился бы минимальное время, чтобы избежать возникновения бескислородных условий или даже анаэробиоза. Длительность пребывания ила зависит, во-первых, от скорости осаждения взвешенных частиц и, во-вторых, от метода сбора и выпуска ила для его возврата в аэротенк.

Активный ил представляет собой хлопьевидную массу и его плотность незначительно превышает плотность воды. Оседаемость (см. кривую Кинша, с. 74), которая оценивается по индексу Мольмана (см. с. 76), зависит от ряда факторов и на нее главным образом влияет присутствие в обрабатываемой воде промышленных сточных вод. Оседаемость может также изменяться во время обработки в результате изменений условий среды: колебаний температуры, нагрузки, содержания растворенного кислорода, случайных нарушений в системе аэрации и т. п. Допустимая гидравлическая нагрузка на поверхность отстойника в большей степени зависит от оседаемости ила. На очистных станциях средних размеров при правильно рассчитанных отстойниках эта нагрузка может достигать максимального значения 2,5 $м^3/(м^2 \cdot ч)$, если активный ил работает в условиях средней нагрузки, и 0,9 $м^3/(м^2 \cdot ч)$ — для ила продленной аэрации. Эти максимальные значения в отдельные периоды желательно уменьшать для трудно оседаемого ила, в ряде случаев до 0,4 $м^3/(м^2 \cdot ч)$ или даже меньше. Объем вторичных отстойников определяется не только из этих пиковых значений, но также и с учетом ежесуточной гидравлической нагрузки. Типичные зна-

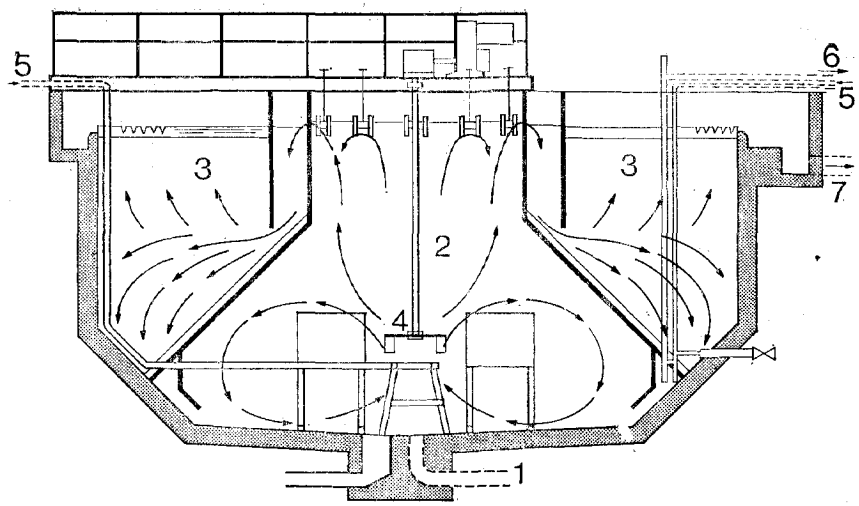


Рис. 8.15. Схема аэроакселатора

1 — впуск сырой сточной воды; *2* — зона аэрации; *3* — зона отстаивания; *4* — аэратор Вортимикс; *5* — воздух; *6* — выпуск избыточного ила; *7* — выпуск обработанной воды

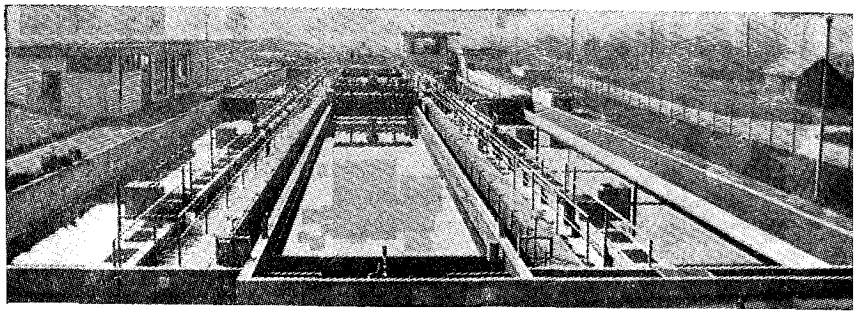


Рис. 8. 16. Очистная станция с совмещенными аэротенками и прямоугольными первичными отстойниками со скребками. Очистная станция Хохдорф, Швейцария

чения для средненагружаемого активного ила и для продленной аэрации принимаются соответственно 24 и 12 м³/(м²·сут), что учитывает различную концентрацию ила и его качество.

Размеры вторичных отстойников, т. е. его площадь поверхности и объем, зависят от следующих параметров: среднего максимального расхода воды и концентрации активного ила; массы поступающего ила; допустимого содержания взвеси в очищенной воде. Другие факторы тоже могут оказать влияние на размеры отстойника, в частности конструкция устройства для сбора очищенной воды, нагрузка по воде на единицу длины водослива (которая обычно не должна превышать 15 м³/(м·ч).

Рециркуляционное отношение, от которого зависит концентрация возвратного ила, определяет объем зоны и длительность пребывания ила во вторичном отстойнике. Если они недостаточны, то объем накапливаемого ила (часто это ограничивающий фактор для вторичного отстаивания) оказывается избыточным; слой ила достигает выпускного водослива и качество воды соответственно также изменяется. Появляется определенный риск возникновения анаэробиоза и в некоторых случаях — денитрификации активного ила, вызывающей всплывание активного ила. Если же рециркуляционное отношение велико, то оседание может быть ухудшено за счет избыточной энергии потока ила. Для ила городских сточных вод с нормальной оседаемостью изменение рециркуляционного отношения в пределах от 50 до 100% к среднему расходу воды является удовлетворительным. Для ила, который оседает хуже, это отношение может быть увеличено до 200%.

Общие размеры биологической системы определяются размерами аэротенка, вторичного отстойника и системы рециркуляции, которая в свою очередь влияет на размеры сооружений.

Эксплуатация вторичного отстойника также зависит от его геометрии: лучшие результаты достигаются в глубоких вертикальных отстойниках с наклонным днищем (угол наклона не менее 50°), но такие сооружения дороги в строительстве из-за ограниченного диаметра. Используются вторичные отстойники со слегка наклонным днищем, вследствие чего возрастает потребность в площадях. В этих случаях требуется скребковый механизм для сбора ила в приямок, откуда он забирается на рециркуляцию. Поскольку для ускорения возврата ила необходимо большое число сборных приямков в отстойнике, разработаны вторичные отстойники с так называемым всасывающим устройством (см. с. 172).

Оборудование для всасывания ила монтируется на подвижном мостике или скреперной стреле таким образом, чтобы не было «мертвых зон», которые в противном случае могли бы ухудшить качество ила. Такие устройства рекомендуются для сооружений большого диаметра и при особых условиях (жаркий климат, плохая оседаемость ила и т. п.). Всасывающие трубы, каждая из которых соответствует короткому скребку, подсоединяются к сборному коллектору, обеспечивающему сбор ила со всего днища сооружения. Всасывающий эффект может быть достигнут гидростатическим напором (ил попадает в металлический канал, из которого он перекачивается насосом или сифонируется), эрлифтом, позволяющим проводить независимый контроль расхода через каждую всасывающую трубу и комбинацией двух систем, в которой эрлифт используется только на период чистки труб.

Стандартное оборудование всасывающего устройства с креплением на мостике фирмы «Дегремон» описано в гл. 7, с. 173.

8.2.3. СИСТЕМЫ АЭРАЦИИ

8.2.3.1. Критерии и сравнение систем аэрации. Системы аэрации выполняют две функции: доставляют кислород микроорганизмам активного ила, а также перемешивают жидкость и гомогенизируют ее, чтобы обеспечить тесный контакт между живой средой, загрязнениями и вводимым кислородом. Эти системы состоят из одного или группы устройств (размещенных в сооружении соответствующих объема и формы) для растворения определенного количества кислорода — обычно атмосферного — в воде.

Аэрация: параметры и стандартные условия. Производительность по кислороду аэрационных систем может быть охарактеризована следующими параметрами: количеством введенного кислорода за 1 ч (выражается в кг растворенного кислорода за 1 ч);

удельным количеством введенного кислорода (в кг растворенного кислорода на кВт затраченной энергии);

производительностью по кислороду (в кг растворенного кислорода за 1 ч на 1 м^3 объема сооружения);

эффективностью растворения кислорода: процент от массы введенного кислорода, который действительно растворился с помощью компрессионной системы (этот параметр позволяет исключить из сравнения фактор эффективности работы используемой воздуходувки, так как этот фактор не зависит от диффузоров воздуха).

Комбинация аэратор — аэротенк рассматривается как единое целое и результаты эксплуатации аэрационной системы должны сопровождаться полным анализом всей системы. Например, наилучшая эксплуатация сооружений по насыщению кислородом может быть при нереальных условиях: высокой затрате энергии на 1 м^3 объема сооружения для поверхностных аэраторов или низком расходе воздуха на диффузор (при мелкопузырчатой системе аэрации).

Различные системы обычно сравнивают при стандартных или нормальных условиях, а именно: в чистой воде; при температуре 10° С (20° С в некоторых странах); стандартном атмосферном давлении, равном 0,1 МПа; концентрации растворенного кислорода 0 мг/л.

Поправки для перехода от стандартных условий к реальным условиям. Чтобы перейти от стандартных условий к реальным, применяют поправочный фактор T:

$$\text{реальные условия} = \text{стандартные условия} \times T.$$

Фактор T есть произведение трех коэффициентов: T_p, T_d, T_t.

Коэффициент T_p (называемый часто α в Англии и США) оценивает перенос кислорода в сточной воде по отношению к чистой воде; он зависит от состава стока (в частности, содержания в нем поверхностно-активных веществ, жиров, взвешенных веществ и т. п.) и собственно системы аэрации и геометрии сооружения.

Коэффициент T_d оценивает дефицит кислорода, который растворяется пропорционально его дефициту $C_s - C_x$ (где C_s — концентрация кислорода при его насыщении, но при действительных условиях, учитывающих солесодержание, атмосферное давление, температуру и т. д.; C_x — концентрация кислорода в жидкости).

При стандартных условиях (10° С) C_s — постоянная величина, равная 11,25 мг/л, а $C_x = 0$, в этом случае

$$T_d = (C_s - C_x)/11{,}25.$$

На величину C_s оказывают влияние:

солесодержание воды. Поправочный коэффициент используется в виде выражения

$$(475 - 2{,}65S)/475,$$

где S — солесодержание в г/л;

температура (см. с. 921);

атмосферное давление (делается поправка обычно только на высоту).

Значение C_x обычно принимают от 1 до 2 мг/л.

Коэффициент T_t характеризует скорость переноса кислорода. Если температура повышается, то скорость переноса в системе газ — жидкость увеличивается. Принимается выражение $T_t = 1{,}024^{t-10}$, где t выражено в °С.

Коэффициенты T_d и T_t не зависят от системы аэрации, а коэффициент переноса T_p зависит от системы аэрации. Поэтому общая производительность по кислороду различных типов аэрационных систем не изменяется, если стандартные условия в точности соответствуют реальным условиям; на этом основано объективное сравнение. Эти условия не используют для определения коэффициента T_p, который может быть определен путем точных измерений на полупроизводственной установке биологической очистки при подаче на нее реального стока. Коэффициент T_p может оказаться существенно ниже при мелкопузырчатой аэрации, чем при крупнопузырчатой системе или поверхностной аэрации, и в значительной степени зависит от наличия поверхностно-активных веществ.

Другие критерии сравнения. Сравнение проводится и по вспомогательным признакам, которые трудно оценить количественно, но которые могут быть оценены качественно, например:

смешение, которое можно достичь при высокой скорости продувки, предотвращающей выпадение ила и обеспечивающей однородность смешанной жидкости;

возможность приспособления к различным условиям при сохранении достаточной производительности;

надежность всех компонентов системы (передаточный механизм, воздуходувка, диффузоры, пористые элементы, трубы и т. п.).

Например, не имеет смысла ставить аэратор высокой производительности по кислороду, если она достигается при недостаточном гидравлическом перемешивании или если аэратор подвержен заиливанию, в результате которого производительность падает и в сооружении могут появиться даже анаэробные зоны.

8.2.3.2. Поверхностная аэрация. Интенсивность процесса поверхностной аэрации зависит от применяемого типа аэратора, его мощности и удельной производительности по кислороду. *Поверхностные аэраторы* делятся на три основные группы:

низкоскоростные турбинные с вертикальной осью с периферийной скоростью 4—6 м/с. Этот тип аэратора забирает воду снизу и через центральную трубу (или без нее) выбрасывает в радиальном направлении;

высокоскоростные с вертикальной осью с частотой вращения 750—1800 мин$^{-1}$, с двигателем, установленным без промежуточного передаточного механизма; импеллер небольшого диаметра обычно располагается в трубе. Этот тип аэратора более удобен для лагун, чем для аэрационных сооружений;

с горизонтальной осью, которые устанавливают либо вдоль, либо поперек потока. Они работают лучше при невысоких удельных затратах энергии.

Ниже описаны условия эксплуатации аэраторов первого типа, которые наиболее часто используются в качестве поверхностных аэраторов.

Мощность, развиваемая на оси аэратора с вертикальной осью вращения, описывается уравнением:

$$p = KN_{\text{р}}D^5N^n,$$

где D — диаметр ротора; N — угловая частота вращения, об/мин; $N_{\text{р}}$ — коэффициент, зависящий от геометрии ротора; n — экспонента с численным значением от 2 до 3.

В зависимости от частоты вращения для заданной глубины погружения мощность обычно изменяется от 2,4 до 2,7. Кроме того, после стартового момента движение воды и, в частности, ее вращение вызывает относительный скоростной сдвиг между скоростями движения турбины и жидкой массы, что снижает мощность. Это падение особенно заметно в крупных сооружениях, если удельная мощность высока.

Удельная производительность по кислороду. В данных системах на удельную производительность по кислороду влияет ряд факторов:

удельная мощность, т. е. потребленная мощность, отнесенная к 1 м^3 объема сооружения; верхний ее предел 70—80 Вт/м^3, с увеличением удельной мощности возрастает удельная производительность по количеству растворенного кислорода;

скорость;

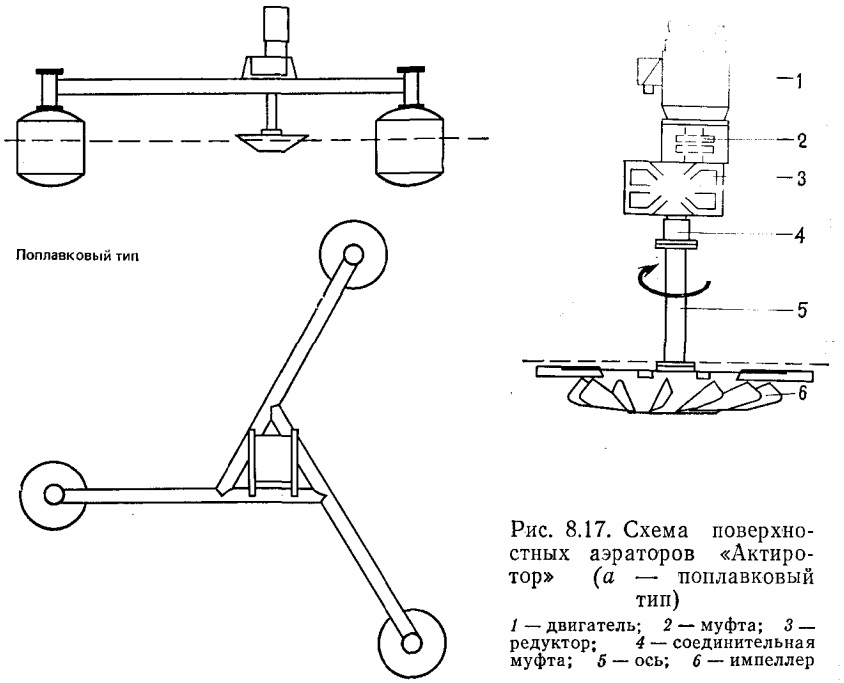


Рис. 8.17. Схема поверхностных аэраторов «Актиротор» (*а* — поплавковый тип)

1 — двигатель; *2* — муфта; *3* — редуктор; *4* — соединительная муфта; *5* — ось; *6* — импеллер

глубина погружения (влияние глубины погружения на эффективность при заданной скорости различно для разных аэраторов);

форма сооружения. В круглом сооружении вращение жидкости происходит легче и это несколько снижает удельную производительность по кислороду (чтобы предотвратить это явление, ставят радиальные перегородки);

отношение площади поверхности к глубине. Оптимальная эксплуатация имеет место в том случае, если сторона квадрата или диаметр сооружения вдвое больше глубины.

Удельная производительность по кислороду низкоскоростных аэраторов колеблется в пределах 1,5—2,5 кг кислорода на 1 кВт·ч (механическая энергия измеряется на оси аэратора).

Смешение. На эффект смешения в сооружении, которое характеризуется скоростью продувки жидкости у дна, влияют два основных параметра: удельная мощность (для данного сооружения скорость увеличивается с ростом мощности) и смоченный радиус. По аналогии с потоком в трубах смоченный радиус определяется отношением объема к площади поверхности воды. Процесс смешения улучшается, если этот радиус увеличивается.

«Актиротор» (рис. 8.19). Фирма «Дегремон» располагает поверхностными аэраторами стандартных мощностей 3—100 кВт для удовлетворения самых различных требований. Существуют

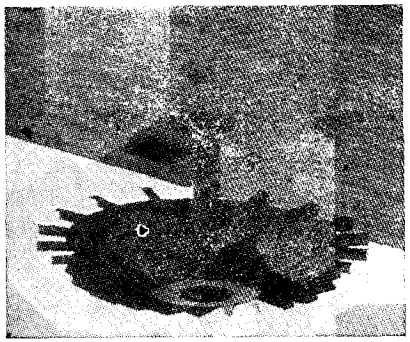


Рис. 8.18. Актиротор *R*8020 (75 кВт), смонтированный на бетонной стенке

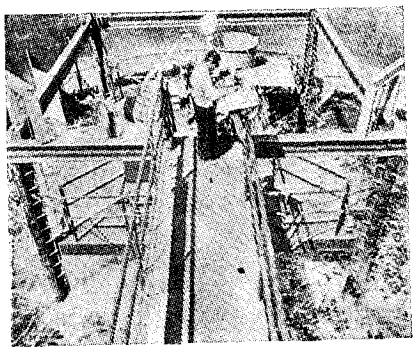


Рис. 8.19. Поверхностный аэратор конструкции Инфилко — Дегремон. Смонтирован в Туксоне, Аризона (США)

низкоскоростные вертикальные турбинные аэраторы с полой втулкой, несущей тонкопрофильные пластины. В собранном виде аэратор представляет собой совершенно открытое колесо, что полностью исключает риск забивания аэратора (цавивание на него волокнистых примесей).

«Актиротор» может быть смонтирован на закрепленном суппорте (мостике или платформе) или на поплавковом оборудовании. Достаточно трех поплавков, чтобы обеспечить работу турбинного аэратора. Из-за высокой мощности перекачки актиротор обычно используют без всасывающей трубы, но он может быть оборудован кожухом при очень плотном иле (аэробная стабилизация).

Стандартная удельная производительность по кислороду находится в пределах 1,8—2,3 кг кислорода на 1 кВт·ч затраченной энергии в зависимости от установленного оборудования. Удельная мощность составляет 40 Вт/м³ объема сооружения.

8.2.3.3. Пневматическая аэрация. В этом процессе воздух вводится в массу жидкости под давлением. Различают три основные категории пневматической аэрации в соответствии с размером образующихся пузырьков:

крупных ($d>6$ мм), когда воздух вводится либо непосредственно через вертикальные трубы, либо через крупнопористые диффузоры;

средних ($d=4$—6 мм), когда размер пузырьков уменьшают различными путями, например использованием спарджеров, мелких отверстий и т. п.;

мелких ($d<3$ мм), когда пузырьки получаются при пропускании воздуха через пористый материал (размер пор 50 мкм).

Стандартная эффективность растворения кислорода определяется несколькими факторами:

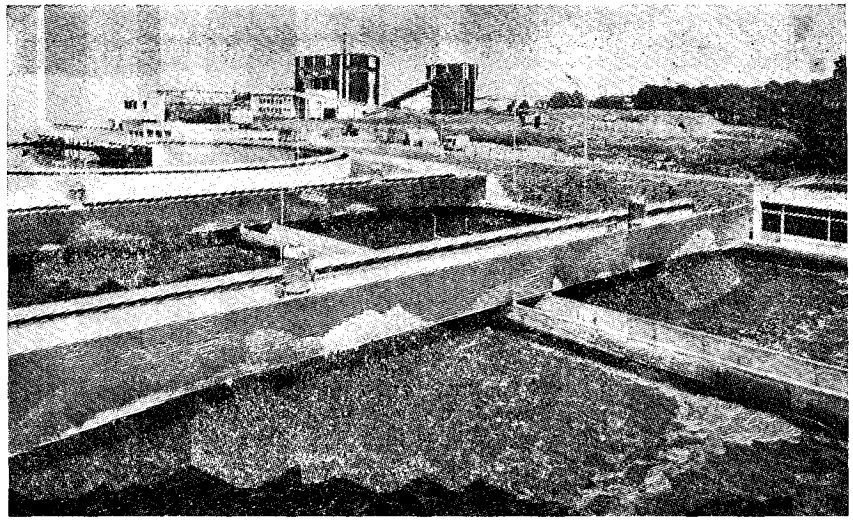


Рис. 8.20. Два аэротенка (объемом 3750 м³ каждый), оборудованные 12 актироторами мощностью по 37 кВт; тип R 6016

типом диффузора и его расположением (изолированные, в ряд, в днище);

глубиной погружения диффузора. Выявлено, что в пределах от 2,5 до 8 м эффективность пропорциональна глубине погружения;

расходом воздуха. Для крупно- и среднепузырчатой систем эффективность возрастает с увеличением расхода. Для системы мелкопузырчатой аэрации чем выше расход, тем больше степень укрупнения пузырьков, эффективность обычно имеет тенденцию к снижению;

площадью поперечного сечения. Эффективность растворения снижается, если соотношение площади к глубине сооружения увеличивается.

Смешение. Обычно смешение вызывает меньше проблем, если аэротенки оборудованы аэраторами компрессионного типа, а не поверхностными аэраторами; компрессионными аэраторами воздух вводится вблизи дна сооружения.

Диффузоры: пористые диски ДР 230, диффузоры Вибрейр, другие диффузоры. Пористые диски ДР 230 выполнены из гранул искусственного корунда (алюминия α) определенного размера, связанных (вследствие адгезии керамики) и превращенных в стекловидную массу при высокой температуре. Материал весьма устойчив к действию сильно коррозионных химикалиев, за исключением фторидов и их производных. Диски закреплены в поливинилхлорид или нержавеющую сталь и смонтированы на погруженных продольных фидерах группами или рассредото-

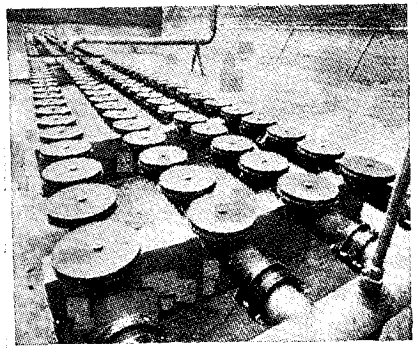


Рис. 8.21. Пористые диффузоры в аэротенке

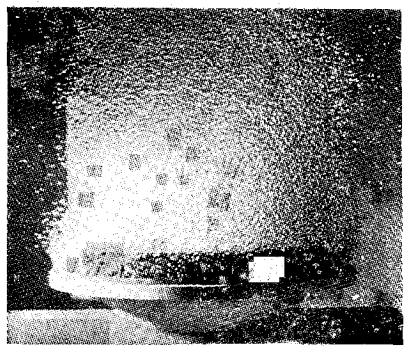


Рис. 8.22. Пористый диффузор в действии

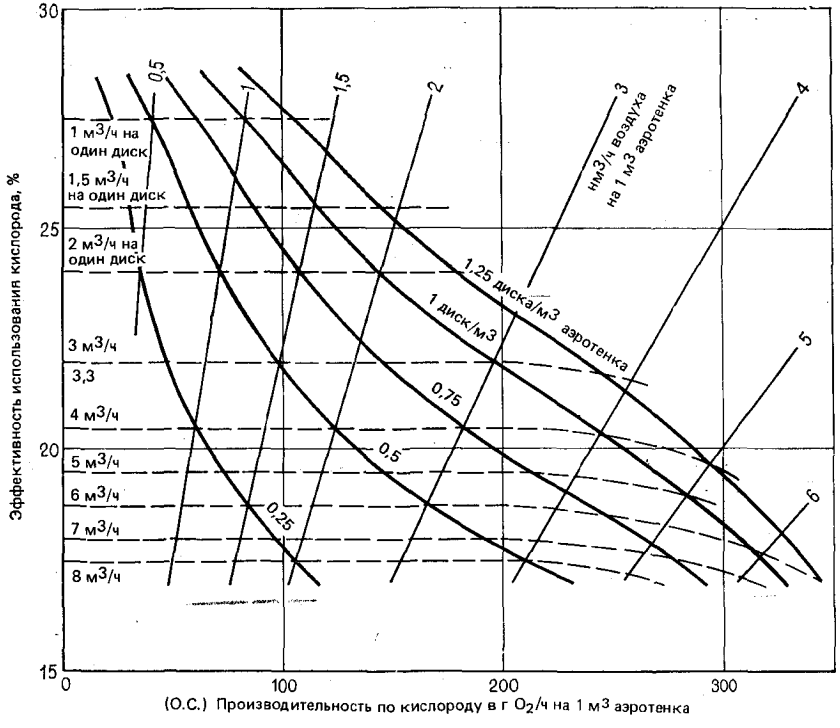


Рис. 8.23. Кривые эффективности для пористых дисков типа ДР 230

ченно у дна сооружения. Диски обеспечивают высокую эффективность по кислороду при стандартных условиях (рис. 8.23) в пределах от 20 до 25% при глубине погружения 4 м. Подаваемый воздух должен быть тщательно профильтрован (содержание пыли предусмотрено менее 15 мг на 1000 м³).

Диффузоры «Вибрейр» позволяют получить пузырек среднего размера. Они состоят из сформованного полиэтиленового основания, снабженного вибрирующим колпачком; подобно дисковым диффузорам монтируются на погруженных фидерах (рис. 8.25).

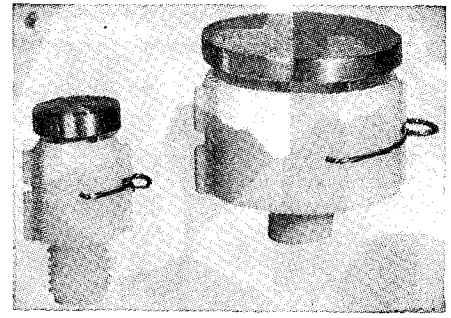


Рис. 8.24. Диффузоры с пузырьком среднего размера, состоящие из полиэтиленового основания, прикрытого вибрирующим колпачком из алюминиевой бронзы

Эффективность использования кислорода для диффузоров «Вибрейр» (8—12% при глубине погружения диффузора 4 м) ниже, чем для дисковых, но диффузоры «Вибрейр» позволяют иметь более упрощенную и дешевую систему кондиционирования, получения и транспортирования воздуха; они особенно пригодны для станций малых и средних размеров.

Диффузоры «Вибрейр» могут обеспечивать прерывистую подачу воздуха.

Другие диффузоры. Трубчатые диффузоры выполнены из пористой керамики (мелкий пузырек), мягкого пластика с резьбой (на цилиндрическом суппорте) (средний пузырек) или из пластиков жестких, скрепленных полиэтиленом или полиуретаном.

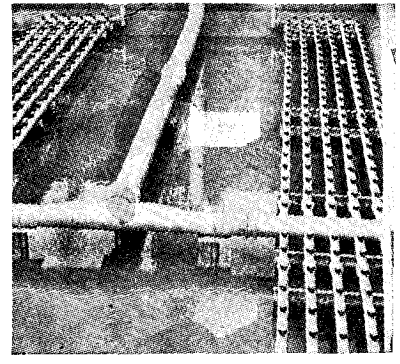


Рис. 8.25. Аэротенк, оборудованный диффузорами типа Вибрейр

В системах с разряжением воздух подается при низком давлении в горловину инжектора, обеспечивающего рециркуляцию содержимого сооружения.

8.2.3.4. Смешанные аэраторы. В некоторых системах объединяются действия механической мешалки и продувки воздуха. Примером такой системы может быть аэратор «Вортимикс Инфилко-Дегремон», который включает в себя механическую мешалку с погружным лопастным импеллером, обеспечивающую циркуляцию жидкости вниз, и распределительную систему подачи воздуха в непосредственной близости от импеллера.

Пузырек среднего размера, получаемый с помощью этого оборудования, измельчается ротором мешалки и мгновенно смешивается с перемешивающейся водой. Водовоздушная смесь направляется к днищу сооружения по диагонали.

Такая система обусловливает непрерывное эффективное перемешивание, поскольку мешалка обладает высокой гидравлической эффективностью, и позволяет осуществлять контроль за эффективностью использования кислорода путем изменения количества подаваемого воздуха. При интенсивном перемешивании с помощью импеллера эффективность использования кислорода в зоне подачи воздуха может достигать 30%.

Общие затраты энергии здесь такие же, как и у низкоскоростных поверхностных аэраторов. Они могут быть снижены, если аэраторы используются преимущественно с целью смешивания. Этот тип оборудования подходит главным образом для станций в регионах с холодным климатом или для случая, когда необходимо исключить образование аэрозолей.

8.2.3.5. Использование чистого кислорода — это давнишняя техника биологической очистки сточных вод.

Преимущества. Применение чистого кислорода дает два основных преимущества:

вследствие очень высокого парциального давления кислорода в подаваемом газе в смесь с активным илом может быть введено во много раз больше кислорода (при определенных затратах энергии), чем при использовании атмосферного воздуха; энергетические затраты ниже при той же производительности по кислороду. Отсюда значительно больше микроорганизмов может быть обеспечено кислородом в единице объема реактора;

по тем же причинам содержание растворенного кислорода в аэрируемой смеси с илом или в воде легко может достигать (или даже превышать) 6—8 мг/л, что для обычной системы аэрации влечет недопустимый перерасход энергии. Очень высокое содержание растворенного кислорода благоприятствует проникновению его во внутрь хлопка активного ила, даже в условиях очень концентрированной суспензии.

Эти преимущества позволяют уменьшить размеры биологического реактора, поскольку увеличивается концентрация активного ила и в то же время возрастает его активность. При равной нагрузке на ил избыточный ил обладает меньшей способностью загнивать и образуется он часто в меньшем количестве, чем в традиционных аэрационных системах.

Применение. Чистый кислород может быть использован:

на станции с активным илом и непрерывной подачей кислорода (например, на очистных станциях для обработки концентрированных промышленных стоков, в которых загрязнения главным образом биоразлагаемые, а также на крупных городских станциях);

на станциях с активным илом, работающих в условиях переменных нагрузок: очистные станции с высоким уровнем колебаний концентрации загрязнений, главным образом в районах туризма, с очень высокой потребностью в кислороде в отдельные сезоны по сравнению со среднегодовой потребностью;

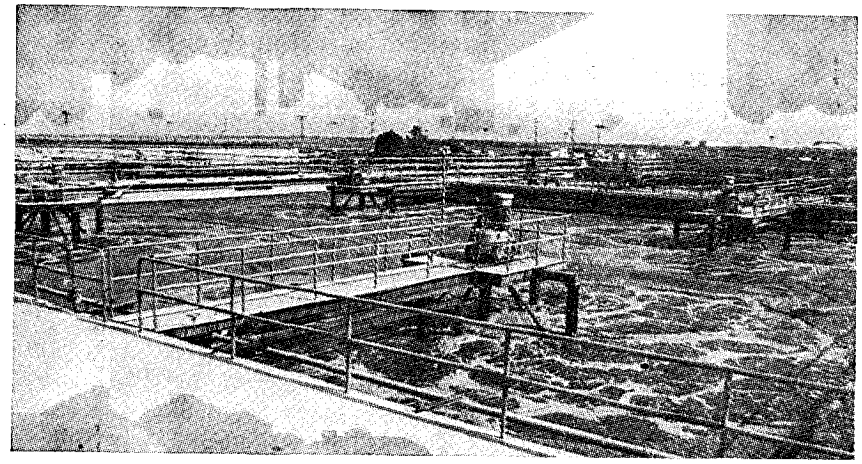


Рис. 8.26. Аэротенк, оборудованный аэраторами Вортимикс. Очистная станция Пало Альто, Калифорния, США (Представлено корпорацией Инфилко — Дегремон)

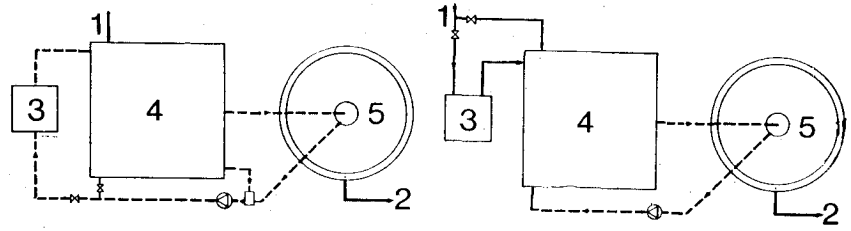


Рис. 8.27. Диаграмма потоков в системах с дополнительным введением кислорода

1 — сырая сточная вода; *2* — обработанный сток; *3* — емкость для пересыщения кислородом; *4* — аэротенк; *5* — конечный осветлитель

для предварительного насыщения сточной воды или смеси кислородом до 10 мг/л или существенно выше с целью дезодорации, обогащения кислородом перед закрытым биофильтром (патент фирмы «Дегремон»), когда размеры биофильтра могут быть заметно уменьшены и подпитки (допинга) на обычных станциях, работающих на атмосферном воздухе, для увеличения содержания растворенного кислорода в аэротенке.

Практическое применение. Наиболее часто системы, использующие обогащенный кислородом газ, включают воздухонепроницаемое закрытое сооружение, в котором «газовая подушка» поддерживается при высоком парциальном давлении кислорода. Такое оборудование наиболее предпочтительно с точки зрения защиты окружающей среды. В исключительных случаях, когда отработанный газ надлежит дезодорировать, применяют газо-

вые скрубберы, которые при работе на кислороде конструктивно более просты, чем для систем с атмосферным воздухом.

Очистка с применением чистого кислорода сильно загрязненных стоков в закрытых емкостях имеет тот недостаток, что затруднено выделение свободной CO_2, образующейся вследствие бактериального дыхания. Чтобы ограничить выделение CO_2, можно увеличить щелочность воды или ввести продувку атмосферным воздухом. По этим причинам более предпочтительной оказывается обработка в две стадии: сначала с кислородом и затем с воздухом. Если чистый кислород используется на первой стадии, то и затраты энергии, и объемы реакторов для очистки от основной части загрязнений могут быть уменьшены. Если же на второй стадии используется воздух, то свободная CO_2 может быть легко выделена, а дегазация и образование пены в конечном осветлителе могут быть уменьшены. Воздух помогает удалить остаточные загрязнения и вызвать нитрификацию.

Чтобы снизить потери, применяют многоступенчатый биологический реактор с рядом отделений, через которые проходит газовая смесь. Для городских сточных вод степень потребления кислорода в реакторе достигает 90%.

Получение кислорода. На небольшие станции кислород доставляют в жидком виде, хранящимся в полностью изолированных контейнерах, снабженных системой испарения.

Для больших станций экономические соображения диктуют устройство местных кислородных установок, за исключением особых случаев, когда рядом имеется кислородная линия, дающая газ в достаточном количестве с центрального пункта получения кислорода.

Кислород на месте может быть получен двумя способами: с помощью молекулярных сит (адсорберы с меняющимся давлением или PSAs) при производительности до 30 т/сут и на криогенных установках при производительности выше 10 или 20 т/сут. Получаемый кислород обычно имеет степень чистоты 95—99%.

8.3. СПОСОБНОСТЬ СТОЧНЫХ ВОД ОБРАБАТЫВАТЬСЯ БИОЛОГИЧЕСКИМ ПУТЕМ

Если данные о пригодности сточной воды к биологической обработке отсутствуют, следует провести лабораторные или полупроизводственные исследования. Такой вид исследования рекомендуется главным образом для производственных стоков или городских, содержащих большие количества производственных стоков.

Состав сточных вод может, конечно, влиять на способность их к биологической обработке, природу и метаболизм бактериальной культуры, которая может адаптироваться к стоку. Например, должна быть известна температура, поскольку биологическая обработка ингибируется как высокой, так и низкой температурой. На способность бактерий существовать и развиваться влияет значение pH среды и присутствие доступных к ассимиляции азота и фосфора. Наконец, важно знать, содержат или не содержат стоки токсичные вещества. Некоторые вещества токсичны абсолютно; другие токсичны относительно, поэтому некоторые бактерии могут адаптироваться к их присутствию.

Чтобы определить параметры для приемлемых биокинетических соотношений, знание которых необходимо для проектирования очистной станции, в непрерывно действующей лабораторной установке должны быть адаптированы именно такие специфические культуры.

8.3.1. ЛАБОРАТОРНАЯ УСТАНОВКА

На рис. 8.28 показан тип установки, монтируемой в лаборатории, для исследований подобного рода; зоны аэрации и осветления разделены. После аэрации активный ил перетекает в нижнюю часть отстойного цилиндра и рециркулирует обратно с помощью эрлифта после отделения его от обработанной воды. Эта установка функционирует по принципу полного смешения, описываемому простейшими математическими зависимостями, параметры для которых устанавливаются по результатам наблюдений.

Эрлифт может быть заменен перистальтическим насосом, который обеспечивает точный контроль рециркулирующего потока и делает аэрационную систему независимой от перекачки возвратного ила.

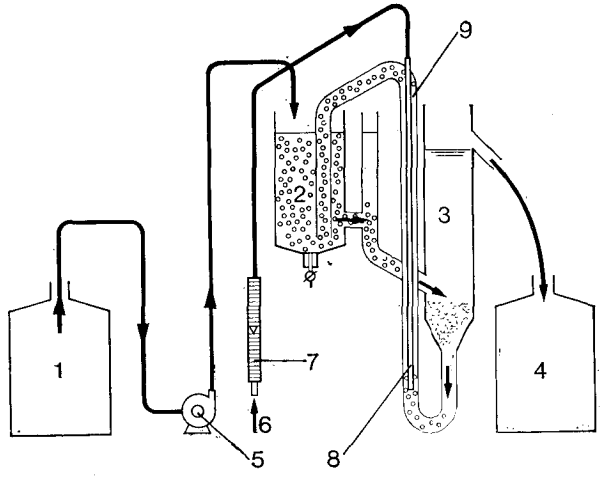


Рис. 8.28.
1 — емкость для сырой сточной воды; *2* — аэрационная камера; *3* — вторичный отстойник; *4* — емкость для обработанной воды; *5* — подающий насос; *6* — воздух; *7* — ротаметр; *8* — аэратор — эжектор; *9* — возвратный ил

Обычный способ акклиматизации активного ила к производственному стоку начинается с ила городской станции, который затем подпитывается в установке смесью бытового стока с исследуемым. Спустя 10 сут доля производственного стока увеличивается через каждые 1—2 сут. Если по достижении 100% производственного стока ил остается жизнеспособным, сток можно подавать на сооружения биологической очистки; если же нет, то можно определить, в какой мере он должен быть разбавлен городскими стоками, чтобы микроорганизмы остались жизнедеятельными. Этот тест может быть, конечно, проведен на воде, в которой либо по ее истинному составу, либо искусственным путем сбалансированы в соответствии с требованиями ассимилируемые углерод, азот и фосфор.

Когда ил акклиматизирован, на установку подают различное количество сточной воды для определения скорости роста, по которой может быть вычислена ожидаемая эффективность очистки для данного типа воды путем сопоставления размеров нагрузки на ил.

С помощью манометрических измерений могут быть затем очень точно определены потребность в кислороде и прирост ила.

8.3.2. МАНОМЕТРИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ-РЕСПИРОМЕТРЫ

Респирометр Варбурга — инструмент для изучения респираторной активности активного ила. Принцип его устройства основан на том, что при постоянных давлении и температуре любые изменения в количестве газа могут быть измерены по изменению его давления. Изменения в количестве кислорода легко измерить, поглощая диоксид углерода, выделяющийся при дыхании, раствором гидроксида калия. Респирометр может быть использован для измерения $БПК_5$, токсичности отдельных веществ, но главным образом для определения дыхательных коэффициентов a' и b', а также коэффициентов прироста или a и b (см. гл. 3).

Процесс потребления кислорода образцом активного ила в колбе Варбурга описывается кривой, сходной с показанной на рис. 8.29. Коэффициент b' представляет собой наклон прямой линии, соответствующей постоянному потреблению кислорода.

Коэффициент a' определяется в опыте с адаптированным илом, взятым из установки, работающей с заданной нагрузкой. Сравниваются кривые потребления кислорода, полученные для двух образцов, один из которых представляет только активный ил, а другой — смесь того же ила и сточной воды. Спустя некоторое время наклон кривой потребления кислорода вторым образцом оказывается равным значению, полученному для первого образца; можно предположить, что вся внесенная со сточной водой БПК обработана и в этот момент разность между количествами потребленного кислорода в двух склянках, соответствующая количеству внесенной БПК, позволяет получить значение коэффициента a'.

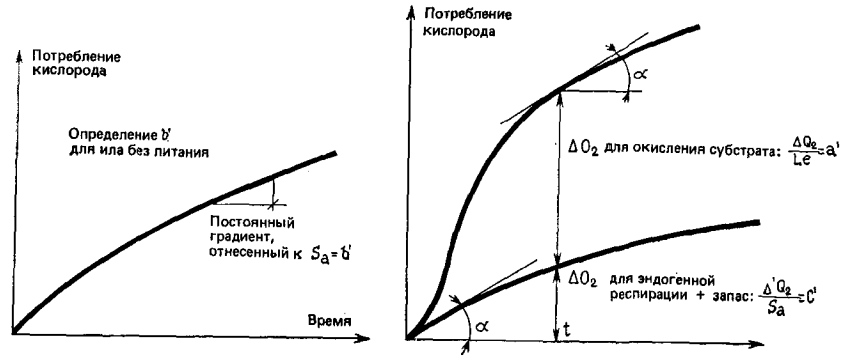


Рис. 8.29. Метод Варбурга для определения респираторных параметров

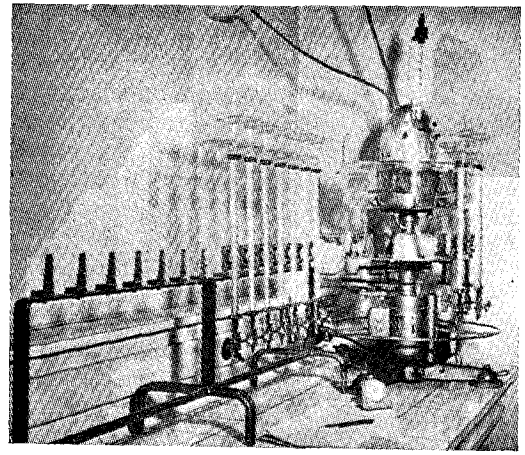


Рис. 8.30. Респирометр Варбурга

Если отношение конечная $БПК/БПК_5$ известно, то могут быть вычислены значения коэффициентов a и b, что дает очень точное измерение потребности в кислороде и прирост ила; определенные по этим кривым результаты более точны, чем получаемые на небольших экспериментальных установках, где источником существенных ошибок являются замеры расхода воздуха и массы ила.

Все данные, полученные с применением экспериментальных установок, в совокупности с результатами, полученными на респирометре Варбурга, вводят в комплексную математическую модель, которая может быть обработана на компьютере. Такие модели дают возможность рассчитать и спроектировать элементы биологической очистной станции.

Этот метод применяется систематически. Результаты показывают, что станции, рассчитанные таким образом, обеспечивают ожидаемую производительность. Однако респирометры Варбурга имеют определенные недостатки: их емкость не может быть увеличена, а поэтому необходимо часто выключать аппарат, что может маскировать некоторые явления, в особенности, если ассимиляция загрязнений проходит очень быстро.

Имеется тенденция заменить эти аппараты большими реакторами типа промышленных ферментеров, в которых потребление кислорода измеряется непрерывно.

8.4. КОНТРОЛЬ БИОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Теоретически биологические процессы можно контролировать автоматически с применением математических моделей, в которых данные, полученные на экспериментальной установке эксплуатировавшейся в установившемся режиме (скорость роста, коэффициент респирации и т. д.), применяются в качестве параметров меняющегося состояния. Недостаточно, однако, контролировать только стадию окисления. Стадия конечного осветления, играющая столь же важную роль, также должна быть проконтролирована.

8.4.1. ЦЕЛЬ КОНТРОЛЯ

Прежде чем определить, какого рода должен быть контроль системы, следует ясно представить цель и пределы изменений, которые должны быть учтены. С функциональных позиций, цель состоит в том, чтобы поддерживать нагрузку на ил в пределах оптимальных значений. Это позволяет:

поддерживать высокую эффективность очистки при увеличении количества загрязнений;

уменьшать затраты энергии, когда количество загрязнений уменьшается, и не оставлять в системе активного ила больше, чем то количество, которое строго необходимо для требуемого уровня эффективности очистки;

обеспечить постоянный рост бактериальной флоры, что гарантирует ее жизненное равновесие и, следовательно, постоянное качество очистки.

С точки зрения эксплуатации различные автоматические приборы должны измерять и регулировать некоторые или все параметры, необходимые для эксплуатации очистной станции:

количество растворенного кислорода в смеси жидкости с илом;

расход избыточного ила;

расход возвратного ила;

в некоторых системах распределение обрабатываемого стока вдоль одной стороны аэротенка;

степень загрязненности поступающего стока;

качество очищенного стока.

На большинстве очистных станций нагрузка на ил не может регулироваться в строго постоянном значении вследствие влияния биологических и гидравлических факторов. Поскольку изменяются расход и степень загрязненности, часовая нагрузка по БПК может изменяться в течение дня в 5 и даже в 10 раз.

Чтобы поддержать постоянное соотношение между клеточной биомассой и количеством снимаемых загрязнений, необходимо иметь $dS_t/S_t = dL_e/L_e$. Так как правый член равенства может достигать очень больших значений (от 20 до 50% в час), соответствующая скорость роста может быть получена при очень высокой нагрузке (в экспоненциальной фазе), т. е. при очень низкой эффективности очистки. Поэтому в течение всего времени должен поддерживаться минимум бактериальной массы с неизбежным падением нагрузки на ил не в часы пик.

С позиций гидравлики слишком большая откачка избыточного ила может привести к разбавлению активного ила, недостаточности флокуляции и последующим трудностям в осаждении. Изменение рециркуляционного расхода имеет ограниченное действие на массу находящегося в системе ила. Опыты показали, что долю ила, возвращаемого из конечного осветлителя в аэротенк путем изменения скорости рециркуляции, трудно поднять выше $^1/_3$ количества ила в осветлителе. В связи с этим усилия должны быть направлены на контроль количества вводимого кислорода и уменьшение колебаний в величине нагрузки на ил. Это может быть сделано путем поддержания соответствия потребности в кислороде и количества ила.

Измерение одного только количества потребляемого кислорода (или пределов его колебаний) слишком неточно и может привести к серьезным ошибкам.

8.4.2. СУЩНОСТЬ КОНТРОЛЯ

Масса активного ила может быть определена с любой степенью точности, а метод, наиболее приемлемый для решения определенной задачи должен быть выбран с учетом размеров очистной станции.

По объему нельзя точно определить массу ила, так как иловый индекс Мольмана колеблется в зависимости от нагрузки на ил. Однако этот индекс изменяется достаточно медленно, поэтому измерение объема можно использовать в качестве первого приближения регулирования процесса.

Если требуется более точный контроль, то измеряют не только количество ила, но и потребность в кислороде. Действительно, увеличение отношения потребности в кислороде 1 м³ объема к концентрации ила свидетельствует о росте нагрузки на ил: чтобы поддержать ее в желаемых пределах, следует, по

возможности, быстро увеличить объем ила, так как это значительно снижает колебания нагрузки на ил по часам суток, а длительность времени, в течение которого сменится масса микроорганизмов в объеме ила, значительно возрастет.

Следует иметь в виду, что при замене измерения объема ила его массой, контроль связи этих величин не нужен. Это — первое уточнение.

Для большей точности необходимо установить эндогенную респираторную активность ила путем измерения ее на непрерывно действующем промышленном респирометре вместо определения кислородной потребности (включающей количество кислорода, требуемое для окисления субстрата).

Это справедливо потому, что до тех пор пока пределы нагрузок, внутри которых все загрязнения сорбированы полностью, не превышены, количество веществ L_e, экстрагируемое из очищаемой воды, есть сумма веществ, ассимилируемых немедленно L_i и накапливаемых L_s

$$L_e = L_i + L_s.$$

Поэтому $O_2 = a'(L_i + L_s) + b'S_a$ (см. гл. 3, с. 000).

Можно вычислить

O_2/S_a — респираторную активность в отношении к массе ила

$$O_2/S_a = a' \frac{L_i + L_s}{S_a} + b' = \frac{a' L_i}{S_a} + c'$$

где $c^1 = L_s/S_a + b^1$.

Но фракция накапливаемого вещества, в свою очередь, зависит от нагрузки на ил

$$L_s/S_a = KC_m,$$

где $c' = a'KC_m + b'$, которое можно переписать в виде

$$c' = KC_m + b''.$$

Значение c', таким образом, определяют как удельную респираторную активность ила в отсутствие какого-либо нового поступления субстрата.

Из кривых Вурмана (рис. 8.31) видно, что при нагрузке меньше 1, значение K практически постоянно, так что зависимость, выражающая соотношение между нагрузкой на ил и удельной респираторной активностью, представляет собой почти прямую линию. На практике данная зона является наиболее используемой, поскольку за ее пределами респираторная активность растет значительно медленнее, чем нагрузка. Это обусловливает тенденцию достижения предельного накопительного потенциала, в результате чего сорбция далее не происходит, поэтому эффективность очистки падает.

Таким образом, удельная респираторная активность c' описывает и нагрузку на ил, и эффективность очистки.

Фактор c' может быть измерен на иле, взятом из аэротенка в такой точке, для которой известно, что в ней полностью исключено присутствие внешнего субстрата.

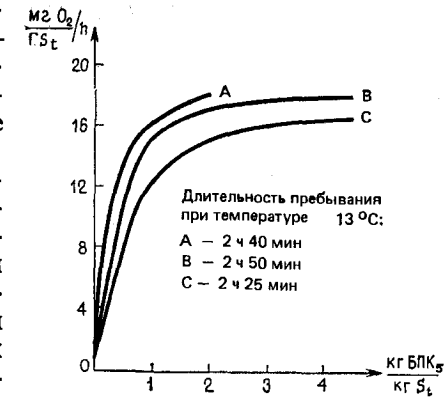


Рис. 8.31

Наконец, при осуществлении контроля процесса биологической очистки на действующей станции необходимая цель может быть, конечно, достигнута путем определения соотношения количества ила и количества поступающей сточной воды, без каких-либо промежуточных определений.

Измерение потребности в в кислороде в реакторе не может дать представления о степени загрязнения, поскольку в сооружении изменяется как скорость роста, так и респираторная активность бактериальной флоры. Потребность в кислороде в реакторе может определить, таким образом, не более чем только тенденцию к изменению. Этого, однако, недостаточно для контроля эксплуатации крупной станции. Более точные измерения нагрузки по загрязнениям могут быть получены с применением прибора для измерения ХПК, а еще лучше — с применением промышленного респирометра, в который помещают смесь обрабатываемого стока и активного ила, сохраняемого в отдельном реакторе (при очень низкой степени его функционирования) при низкой нагрузке на ил.

Промышленные респирометры этого вида могут быть разработаны для раздельных измерений быстро ассимилируемых загрязнений и загрязнений, которые разрушаются медленно после накопления их вне клетки или внутри клетки (взвешенные вещества, коллоиды, молекулы больших размеров). Данные, получаемые из этих измерений, обрабатываются на компьютере, который контролирует процесс биологической очистки при использовании математических формул типа Лефорта — Эккерта. Такое прямое измерение нагрузки по загрязнениям имеет несомненное значение как измеритель количества поступающих на станцию загрязнений и как средство прямого регулирования в двух следующих случаях:

на станциях с первичными отстойниками, когда контроль биологической очистки может быть предсказан очень точно;

на станциях, работающих с перегрузкой или же запроектированных для обработки лишь части максимальной нагрузки. В этом случае можно оценить оптимальное количество загрязнений, которое станция способна принять, чтобы обеспечить требуемую степень очистки.

8.4.3.1. Контроль подаваемого кислорода. Сигнал от анализатора кислорода приводит в действие воздуходувку или поверхностный аэратор. Применяют несколько способов регулирования в зависимости от требуемой степени точности:

содержание кислорода поддерживается в сооружении в заданном пределе минимум — максимум;

подача кислорода изменяется только тогда, когда содержание растворенного кислорода оказывается выше или ниже установленного предела в течение заданной продолжительности времени;

количество вводимого кислорода незначительно увеличивается или уменьшается с минимально возможным интервалом между пульсациями. Это исключает риск «помпажа» и делает возможным использование регулирующего эффекта в биологическом реакторе.

При использовании воздуходувок расход воздуха может быть изменен следующим путем:

включают или выключают резервные агрегаты;

включают или выключают различные односкоростные или многоскоростные агрегаты в каскаде;

увеличивают или уменьшают напор с нагнетающей стороны центробежных воздуходувок;

непрерывно изменяют скорость вращения;

непрерывно изменяют направление лопастей воздуходувки.

При использовании поверхностных аэраторов возможны следующие варианты регулирования подачи воздуха:

прерывистые остановка или пуск аэраторов с помощью реле времени;

эксплуатация их при различных скоростях;

изменение степени погружения лопаток;

непрерывное изменение скорости вращения.

При компрессионной подаче воздуха на глубину свыше 3 м можно получить высокую эффективность использования энергии в широких пределах расхода воздуха, что невозможно при малой глубине продуваемого слоя воды. Это относится к поверхностным аэраторам, поскольку их удельная мощность изменяется в широких пределах в зависимости от глубины погружения и скорости вращения.

Более того, содержание растворенного кислорода в аэротенке-смесителе можно регулировать очень точно, поскольку кислород равномерно распределяется во всей массе жидкости, но в аэротенке, рассчитанном на ступенчатую аэрацию или же на ступенчатую подачу воды, этого добиться нельзя. В связи с этим необходимо поставить ряд датчиков во всех отделениях сооружения и изменять количество подаваемого кислорода с

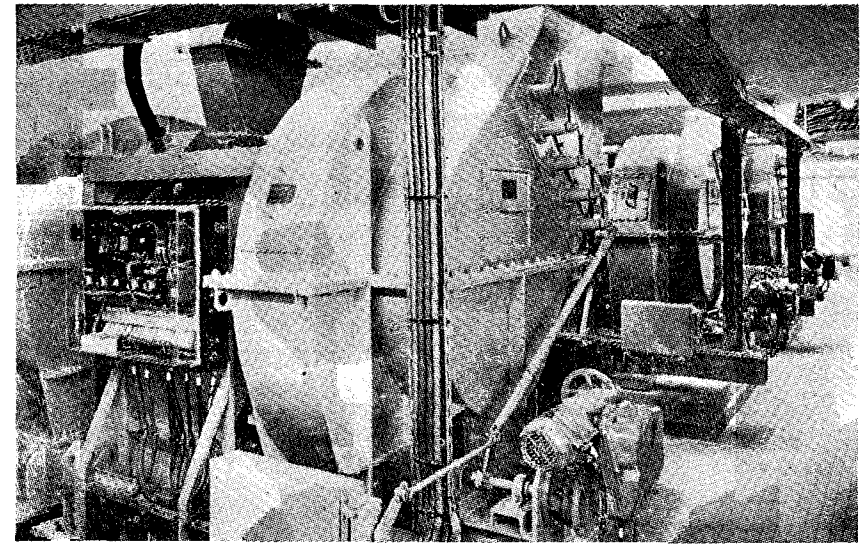


Рис. 8.32. Галлерея центробежных воздуходувок (слева — узел контроля)

учетом всех данных, получаемых от этих датчиков. Поэтому экономия энергии, получаемая в результате регулирования, сомнительна, если содержание растворенного кислорода в разных отделениях колеблется в слишком широких пределах. Это положение может быть улучшено автоматическим выравниванием скорости окисления путем обеспечения дистанционного контроля распределения поступающей на обработку воды вдоль всей длины сооружения.

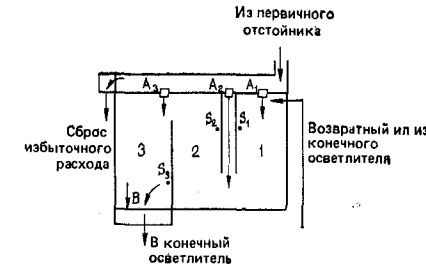


Рис. 8.33

В качестве примера рассмотрим аэротенк со ступенчатой подачей воды (рис. 8.33), в котором поток из первичного отстойника распределяется на три части A_1, A_2 и A_3, затем жидкость удаляется через водослив B, а возвратный активный ил подается в первый канал *1*. Можно предусмотреть ряд различных комбинаций разделения потока сточной воды. Если подаваемая нагрузка изменяется таким образом, что отклонения в содержании растворенного кислорода, измеренного в пробах S_1 и S_2, превышают заданное предельное значение, то система автоматически переключает распределение потока, что даст отклонения ниже заданного предела. Общее количество подаваемого

воздуха регулируется автоматически по уровню растворенного кислорода в пробе S_3.

8.4.3.2. Контроль массы ила обеспечивается изменением количества сбрасываемого избыточного ила и расхода возвратного ила.

Сброс избыточного ила. Может быть выбрана одна из следующих систем удаления ила, в соответствии с характером стока, размерами станции, требуемой степени очистки и суточными колебаниями нагрузки:

сброс постоянного расхода;

сброс запрограммированного изменяющегося расхода.

Эти достаточно простые методы могут быть объединены с одновременным измерением объема или массы ила:

сброс постоянного расхода с контролем нижнего уровня количества ила;

сброс запрограммированного и изменяющегося по времени количества ила в зависимости от верхнего и нижнего пределов количества ила (сброс может быть увязан с количеством ила, находящимся в системе);

удаление постоянного количества ила на крупных городских очистных станциях (способ имеет тот недостаток, что ил удаляется и тогда, когда поступает пиковое количество загрязнений);

удаление запрограммированного и изменяющегося количества ила (в данном случае количество ила в системе изменяется автоматически в соответствии с временем суток).

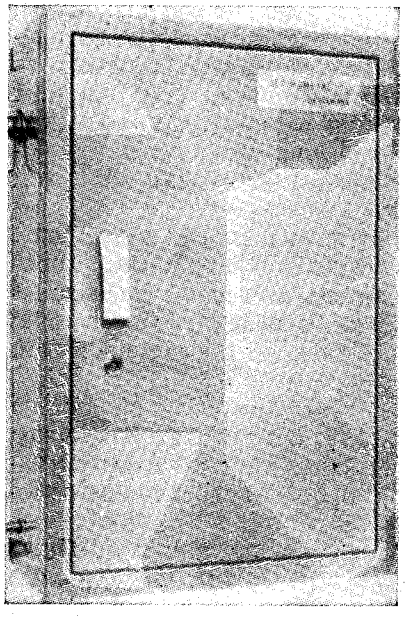
Ни один из вышеописанных методов не дает эффективного и непосредственного отклика на изменение нагрузки на ил. Это может быть достигнуто путем включения в систему измерения показателя кислородной потребности бактериальной флоры. Возможны следующие решения:

удаление ила, в зависимости от которого обеспечивается управление подачей воздуха. Количество ила в сооружении (оцениваемое в процентах или по массе) поддерживается таким, чтобы обеспечить, по возможности, постоянное отношение его к потребности в кислороде; последний показатель обусловливает производительность генератора кислорода (рис. 8.34);

удаление ила с постоянной респираторной активностью. В этом случае в системе всегда остается минимальное количество ила;

удаление в зависимости от нагрузки по загрязнениям на входе в систему. Масса ила регулируется по степени загрязнения стока.

Скорость рециркуляции. Изменение рециркуляционного расхода позволяет: уменьшить объем ила в конечном осветлителе в часы пик или увеличить его объем вне часов пик. Но при этом должно быть обеспечено хотя бы минимальное время пребывания в конечном сооружении и рециркуляционный поток не



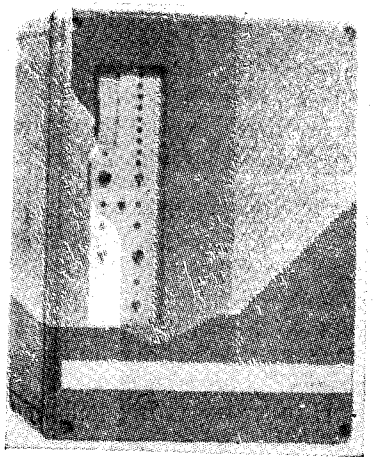


Рис. 8.35.

Рис. 8.34. Приборы для измерения концентрации ила (седимометры)

должен превышать пиковый расход, поскольку по гидравлическим причинам объем ила в процессе осаждения может увеличиться, а качество очищенной воды снизиться.

Возможны альтернативы:

рециркуляционный расход программируется на определенный период;

скорость рециркуляции постоянна или слегка варьирует с ограничением по верхнему пределу рециркуляционного расхода;

рециркуляционный расход изменяется в зависимости от расхода поступающей воды.

8.4.3.3. Контроль допустимой нагрузки по загрязнениям. Насосы или другие делители расхода, контролирующие поступающий поток, могут быть отрегулированы с учетом количества загрязнений, поступающих в систему. Практически бывает необходимо обработать:

либо постоянное количество загрязнений, что достигается увеличением или уменьшением расхода в соответствии с концентрацией загрязнений в исходной воде;

либо изменяющееся количество загрязнений в зависимости от самоочищающей способности водоприемника (выраженной по его расходу). Количество загрязнений, которое нужно исключить, подсчитывается автоматически и показывается «регулятором загрязнений»;

либо количество загрязнений, изменяющееся в течение суток.

Параллельно с регулированием нагрузки по загрязнениям, поступающей в систему, можно регулировать количество загрязнений, выходящих из системы; наконец, возможно осуществить автоматическое управление качеством очистки. Этот вариант может быть использован, например, при рециркуляции очищенной воды в начало сооружений или регулированием поступающего расхода устройством накопительной емкости или же путем изменения нагрузки на ил.

8.4.3.4. Контроль систем, работающих на чистом кислороде. Проблема усложняется необходимостью поддерживать минимальное парциальное давление кислорода в газовой фазе реактора закрытого типа и в то же время обеспечить некоторую утечку газа, чтобы предотвратить постоянное обогащение этой фазы углекислым газом и азотом.

Наиболее часто используются системы контроля вводимого кислорода на базе измерения общего давления газовой фазы в первом отделении реактора; утечки контролируются путем измерения парциального давления кислорода в последнем отделении.

Упомянутые системы могут быть снабжены, как и обычные сооружения, работающие при продувке воздухом, управлением аэраторов, основанном на контроле содержания растворенного кислорода.

Если используется один чистый кислород, перемешивание может оказаться более важным фактором, чем оксигенация.

Для особых целей контрольное оборудование комплектуется с детектором углеводородов.

9. ФИЛЬТРОВАНИЕ ВОДЫ

9.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Фильтры предназначены для удаления из жидкости содержащихся в ней взвешенных веществ. Этот процесс осуществляется либо на поверхности, либо в глубине фильтрующего материала. Для поверхностного фильтрования необходимо наличие твердого опорного материала, а для глубинного — зернистой фильтрующей загрузки.

Поверхностное фильтрование осуществляется через:

сетчатые перегородки (путем процеживания, фильтрования, микрофильтрования, фильтрования под давлением или под вакуумом и т. д.);

объемные элементы из пористых материалов значительной толщины (фильтры из пористой керамики или патронные фильтры);

жесткие каркасы из пористого материала с предварительно нанесенным фильтрующим слоем (намывные фильтры трубчатые, рамные, лотковые, барабанные и др.).

Глубинное фильтрование осуществляется путем применения однослойных или многослойных зернистых фильтрующих загрузок.

Основные теоретические положения этих методов фильтрования были рассмотрены в гл. 3, с. 81. Чтобы перейти от теоретических положений к практическому выбору наиболее пригодных фильтров и использованию их в конкретных условиях, необходимо иметь четкое представление о различных механизмах процесса фильтрования.

9.1.1. МЕХАНИЗМЫ ФИЛЬТРОВАНИЯ

В зависимости от свойств задерживаемых частиц и используемых фильтрующих материалов процесс фильтрования может включать один или более из следующих трех механизмов: отложение, фиксацию, отрыв.

9.1.1.1. Механизмы отложения бывают двух типов: механическое задержание фильтруемого материала и отложение взвешенных частиц в порах.

При механическом процеживании задерживаются все частицы, размеры которых превышают размеры пор фильтрующего материала или пустот между уже задержанными частицами, которые сами образуют фильтрующий материал. Чем меньше размеры пор фильтрующего материала, тем более заметным будет это последнее явление (заполнение пустот): оно не имеет существенного значения для фильтрующих загрузок из относительно грубых материалов, но играет очень большую роль при фильтровании через мелкопористые материалы: микросетки, рукавные фильтры и т. д.

Отложение взвешенных веществ в порах фильтрующего материала; взвешенные частицы движутся с потоком жидкости, если их размер меньше размера пор, частицы могут пройти сквозь фильтрующий материал, не задерживаясь. Однако различные причины могут изменить траекторию движения частиц, что приводит к контакту их с поверхностью фильтрующего материала.

Этими причинами могут быть: прямое столкновение; диффузия за счет броуновского движения; прилипание за счет ван-дерваальсовых сил; инерция частиц; осаждение (частицы могут оседать на материале загрузки под воздействием сил гравитации независимо от направления фильтрования); вращательное движение под действием гидродинамических сил; коагуляция в результате действия ферментов (т. е. биологической пленки в медленных фильтрах).

Такие механизмы отложения имеют место в основном при глубинном фильтровании.

9.1.1.2. Механизмы фиксации. Фиксирование частиц на поверхности фильтрующего материала обусловлено малыми скоростями движения жидкости, физическими силами (защемление, когезия) и силами адсорбции, в основном ван-дер-ваальсовыми силами.

9.1.1.3. Механизмы отрыва. В результате явлений, описанных выше, происходит уменьшение порового пространства фильтрующего материала вследствие осаждения частиц. Поэтому скорость потока возрастает и его характер может измениться от ламинарного к турбулентному. Задержанные загрязнения могут частично отрываться и перемещаться потоком глубже в тело загрузки и даже выноситься с фильтратом.

Если твердые коллоидные частицы в той или иной степени сфлокулированы, то свойства их изменяются, а их задержание не в полной мере описывается вышеизложенными механизмами. Прямое фильтрование жидкостей, в которых взвешенные вещества сохраняют свое естественное состояние и электрический заряд, будет поэтому сильно отличаться от фильтрования скоагулированных жидкостей.

9.1.2. ЗАГРЯЗНЕНИЕ И ПРОМЫВКА ФИЛЬТРУЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ

Процесс загрязнения представляет собой постепенное блокирование порового пространства фильтрующего материала. Если на входе в фильтр поддерживается постоянный напор, то в результате загрязнения расход фильтрата будет снижаться. Чтобы производительность фильтра оставалась постоянной, напор на входе необходимо увеличивать.

Скорость загрязнения фильтра зависит от следующих факторов:

природы задерживаемых частиц (чем больше взвешенных частиц содержится в жидкости, чем выше адгезионные свойства этих частиц и чем быстрее способны они укрупняться, тем выше будет скорость загрязнения фильтра);

скорости фильтрования;

характеристик фильтрующего материала (размера пор, однородности зерна по размерам, степени шероховатости и формы зерен фильтрующего материала).

Влияние этих факторов рассмотрено в гл. 3.

Когда фильтр загрязняется, необходимо восстановить его первоначальные свойства путем эффективной и экономичной промывки; выбор метода промывки зависит от конструкции фильтра и природы задерживаемой взвеси.

9.1.3. ВЫБОР МЕТОДОВ ФИЛЬТРОВАНИЯ

Выбор способов поверхностного фильтрования или фильтрования через зернистые загрузки обусловлен несколькими критериями:

свойствами фильтруемой жидкости и загрязнений, содержащихся в ней, характером изменения этих свойств во времени;

требуемым качеством фильтрата и допустимыми отклонениями;

качеством задержанного фильтром осадка (если целью является его утилизация);

условиями монтажа;

имеющимися возможностями для промывки.

Различные методы требуют различных капитальных и эксплуатационных затрат, которые, в свою очередь, зависят от метода предварительной обработки фильтруемой жидкости, способа промывки, степени автоматизации процесса и способов контроля за ним и т. д.

При выборе типа фильтра важно учитывать не только реальную возможность осуществления простой, эффективной и экономичной промывки, но и необходимость получения фильтрата наилучшего качества, поскольку обеспечить это качество можно лишь в том случае, когда технология промывки позволяет сохранить первоначальные характеристики фильтрующего материала.

9.2. ПОВЕРХНОСТНОЕ ФИЛЬТРОВАНИЕ

В зависимости от конкретных условий этот тип фильтрования может осуществляться на тонких сетчатых перегородках, объемных элементах из пористых жестких материалов или на жестких каркасах из пористых материалов с предварительно нанесенным фильтрующим слоем.

9.2.1. ФИЛЬТРОВАНИЕ ЧЕРЕЗ СЕТЧАТЫЕ ПЕРЕГОРОДКИ

Существует много типов фильтров, в которых используется тонкая фильтрующая перегородка. Они отличаются принципами работы и могут быть либо открытыми, работающими при атмосферном давлении, либо закрытыми напорными.

Рассмотрим характеристики фильтров, обеспечивающих тонкое фильтрование, поскольку фильтры других типов рассмотрены в разделах этой книги в связи с грубой очисткой воды и иных жидкостей. Такое тонкое фильтрование чаще всего называется микрофильтрованием в отличие от макрофильтрования, процесса, при котором задерживаются частицы крупностью бо-

лее 150 мкм, и ультрафильтрования, когда удаляются частицы размером 0,4—0,004 мкм (см. гл. 12).

9.2.1.1. Микрофильтрование при атмосферном давлении. Основная цель микрофильтрования — удаление планктона, содержащегося в поверхностных водах. При этом конечно удаляются взвешенные частицы большого размера и частицы растительного и животного происхождения, содержащиеся в воде. В зависимости от изменения расхода воды и способности частиц, содержащихся в ней, забивать фильтровальные сетки, используются различные устройства для регулирования скорости вращения барабана и один или несколько рядов промывных форсунок.

Оптимальные результаты эффективности микрофильтрования достигаются путем поддержания более или менее постоянных потерь напора, обусловленных частичным забиванием сеток задержанными частицами. Однако эффективность работы установки всегда будет ограничена несколькими факторами:

промытая фильтровальная сетка не обеспечивает надлежащего задержания в начале фильтроцикла, и степень очистки при этом определяется только размерами ячеек;

планктон никогда не удаляется полностью. Он может опять размножаться, особенно если повысится температура;

мельчайшие яйца некоторых низших ракообразных могут легко проходить через фильтровальную сетку и развиваться, в результате чего в последующих резервуарах могут быть обнаружены видимые невооруженным глазом организмы;

из-за опасности коррозии фильтровальной сетки или ее подложки нельзя применять непрерывную обработку воды высокими дозами хлора;

поверхность микрофильтров должна быть достаточно велика, чтобы обеспечить удаление большого количества планктона, развивающегося в определенные периоды года. Если она слишком мала, то в периоды интенсивного развития планктона и во время паводков производительность станции может значительно снизиться.

Металлические или пластмассовые фильтровальные сетки в большинстве случаев имеют размеры ячеек от 20 до 40 мкм и в исключительных случаях 10 мкм. Чем меньше размер ячеек, тем больше должна быть площадь поверхности микрофильтра. Так, при размере ячеек 35 мкм скорость фильтрования должна быть не более 35 м/ч в расчете на общую площадь поверхности микрофильтра (50 м/ч в пересчете на погруженную поверхность микрофильтра), а в расчете на пиковую концентрацию взвешенных веществ — 10 м/ч (см. анализы 712 на с. 990).

Эффективность снижения содержания взвешенных веществ в результате микрофильтрования составляет 50—80%, в среднем около 65%. Для сравнения отметим, что хорошо работающий отстойник обеспечивает снижение содержания взвешенных

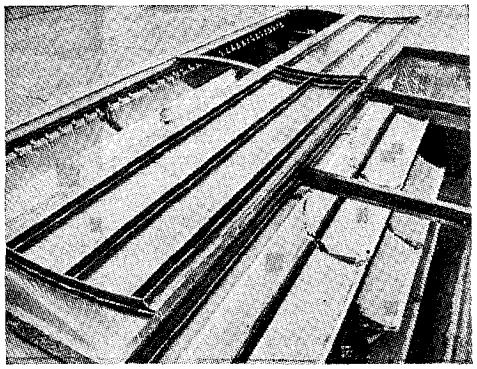


Рис. 9.1. Фильтрующие элементы микрофильтра (без воды)

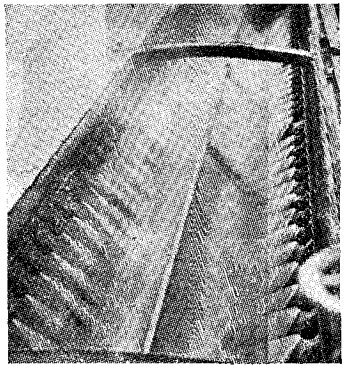


Рис. 9.2. Промывка фильтровальной ткани микрофильтра

веществ на 80—90% без предварительного хлорирования и на 95—99% с предварительным хлорированием.

Микрофильтры следует рассматривать только как устройства с ограниченной эффективностью очистки. Их целесообразно применять для обработки воды с небольшим содержанием взвешенных веществ. При этом удаляются лишь наиболее грубые взвешенные частицы, а цветность воды и содержание растворенных органических веществ не изменяются.

Для удаления планктона наиболее эффективным методом является отстаивание с предварительным хлорированием.

9.2.1.2. Микрофильтрование под давлением обычно осуществляется на фильтрах трех типов: дисковых, каркасно-навитых и патронных.

● *Дисковые фильтры,* в которых фильтрование происходит в пространстве между дисками, собранными в пакеты, особенно чувствительны к наличию в воде водорослей и волокнистых материалов, способных необратимо забивать зазоры между дисками.

Для удаления из воды частиц размером менее 10 мкм применяют фильтры производительностью 10—100 м³/ч. При удалении частиц крупностью 150 мкм производительность одного фильтра может достигать 250 м³/ч.

● *Каркасно-навитые фильтры* с использованием лотковых, трубчатых, корзиночных или других типов несущих элементов, покрытых:

металлической сеткой, плоской или профилированной, с целью увеличения площади поверхности фильтрования. Фильтры этого типа особенно подвержены забиванию волокнистыми материалами и расклиниванию твердыми частицами (например, мелкими частицами песка). При размерах ячеек 2—40 мкм производительность фильтров составляет 0,1—150 м³/ч;

металлической или полимерной проволокой, навитой на рамы. Они также подвержены расклиниванию песком и другими твердыми частицами. Крупность задерживаемых частиц достигает 3 мкм. При размере прозоров 5—125 мкм производительность фильтров этого типа может быть 10—1000 м³/ч;

проволочными профилями особого сечения, навитыми на специальные стояки. Эта конструкция позволяет устранить недостатки, присущие рассмотренным фильтрам. При размере прозоров 80—125 мкм производительность такого фильтра может составлять от нескольких кубических метров в час до более 5000 м³/ч.

● *Фильтры с патронными элементами или тонкими фильтрующими пластинами,* изготовленные из гофрированного или плоского картона, целлюлозы или синтетических волокон (они могут выбрасываться после использования), часто используют как фильтры тонкой очистки, когда воду необходимо тщательно очистить от взвешенных частиц, которые могут проскочить на предыдущих стадиях обработки (например, при приготовлении пива, газированной воды и т. д.). На фильтрах этого типа могут быть удалены очень мелкие частицы порядка нескольких микрон и даже некоторые бактерии. Однако на такие фильтры нельзя подавать воду с относительно высоким содержанием взвешенных веществ, поскольку фильтрующие элементы немедленно забьются.

9.2.2. ФИЛЬТРОВАНИЕ ЧЕРЕЗ ПОРИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ БОЛЬШОЙ ТОЛЩИНЫ

При этом способе обработки фильтрующий материал обеспечивает задержание частиц не только на своей поверхности, но и в глубине материала, хотя она и не очень велика.

В зависимости от условий фильтрования необходимая пористость обеспечивается в результате применения:

ткани из хлопка, стекловолокна, полипропилена и других волокон, обернутой вокруг жесткого каркаса, пористость которого убывает в направлении фильтрования. Производительность фильтров этого типа изменяется от сотых долей до 500 м³/ч при размерах пор 0,3—75 мкм;

пористой керамики, металла, песка, фарфора, пластмасс и др. Фильтры Чемберланда оборудованы фарфоровыми трубками с очень мелкими порами, обусловливающими очень высокие потери напора (несколько сотых долей кПа) при небольших расходах воды. При загрязнении эти трубчатые элементы могут быть удалены и в некоторых случаях очищены паром. Однако полностью очистить их практически невозможно.

Керамические материалы могут иметь размеры пор менее 5 мкм. Производительность фильтров с применением пористой керамики (при размерах пор 40 мкм) составляет до 400 м³/ч.

9.2.3. ФИЛЬТРОВАНИЕ ЧЕРЕЗ ПОРИСТЫЕ МАТЕРИАЛЫ С НАМЫВНЫМ СЛОЕМ

Фильтры с намывным слоем применяют в тех случаях, когда необходимо обрабатывать большие расходы воды и при этом требуется избежать необратимого загрязнения фильтрующих элементов. Процесс фильтрования происходит не через твердый пористый материал, а через фильтрующий материал, введенный в аппарат в начале каждого фильтроцикла и образующий микропористый слой на поверхности твердого пористого материала. Как только фильтр загрязняется, намывной слой удаляют промывкой. Структурно намывной слой состоит из большого количества каналов очень малого диаметра, что обеспечивает получение фильтрата с малой мутностью.

9.2.3.1. Трубчатые фильтры

Принцип действия. Намывные фильтры «Дегремон» состоят из цилиндрического сосуда с выпуклыми торцами, оборудованного внутри большим числом вертикальных трубчатых элементов, закрепленных на опорной плите. Трубчатые элементы представляют собой перфорированные полые цилиндры из нержавеющей стали, вокруг которых обернута тонким слоем ткань из синтетического волокна, в форме рукава; на наружную поверхность ткани намывается фильтрующий слой.

Размер частиц намываемого фильтрующего материала меньше размеров пор в волокнистом материале рукава, и тем не менее, эти частицы задерживаются волокнистым материалом рукава, поскольку они осаждаются на сводиках, образующихся между волокнами рукава и более крупными частицами намывного материала. Наносить намывной слой необходимо с большой осторожностью. Перед началом микрофильтрования желательно наносить намывной слой в режиме рециркуляции, чтобы гарантировать полное осаждение мелких частиц в намывном слое.

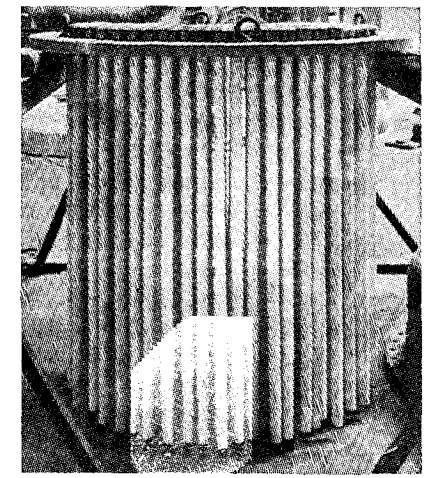


Рис. 9.3. Опорная плита с цилиндрическими фильтрующими элементами

Как только фильтрат станет чистым, можно приступить к фильтрованию. Скорость потока воды может быть 1—15 м/ч в зависимости от способа фильтрования, природы задерживаемых веществ, их концентрации, свойств осадка уже задержанного на фильтре и длительности фильтроцикла. Как пра-

вило, получается фильтрат высокого качества, за исключением случаев, когда жидкость содержит очень мелкие коллоидные частицы. Чтобы удалить такие частицы, необходимо выбрать для намывного слоя либо очень тонкий материал с риском быстрого забивания фильтра и короткими фильтроциклами, либо материал с адсорбционными свойствами.

Можно увеличить длительность фильтроцикла или повысить скорость фильтрования, если начинать процесс очистки воды при небольшой толщине намывного слоя, добавляя присадочный материал во время фильтрования. Поскольку в этом случае взвешенные вещества, отложившиеся на намывном слое, смешиваются с присадочным материалом, образуется не труднопроницаемый «кокон», а пористый слой, который участвует в процессе фильтрования, не вызывая быстрого увеличения потерь напора.

Промывка производится тогда, когда будет достигнута максимальная степень загрязненности.

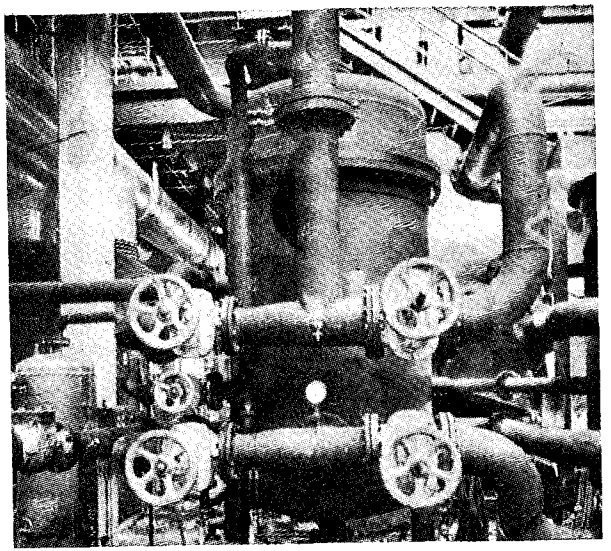
Промывка. Если требуется эффективная промывка, взвешенные вещества, задержанные на намытом материале, должны быть полностью удалены со всех фильтрующих элементов. Это достигается обычной водо-воздушной промывкой или промывкой по технологии «Канон», которая дала свое название фильтру фирмы «Дегремон».

● Обычная промывка. Как только фильтр будет остановлен и верхняя часть его разгерметизирована, из него сбрасывают часть воды, чтобы образовалась воздушная подушка. Затем клапан впуска воздуха закрывают. Воздух сжимается под действием подающего насоса. Клапан в основании фильтра быстро открывается; резкая декомпрессия воздуха выталкивает воду, которая проходит через фильтрующие элементы изнутри и освобождает их от загрязнений. Затем фильтр опорожняется и элементы промываются.

● Промывка «Канон» (патент фирмы «Дегремон»). Как и в предыдущем случае, образуется воздушная подушка в верхней части фильтра; затем при герметизированном фильтре сжатый воздух нагнетается под опорную плиту. Воздух перемещает некоторое количество воды через фильтрующие элементы по направлению к верхней части фильтра. Под плитой воздух подвергается резкой декомпрессии при открытии клапана в атмосферу: вода проходит изнутри фильтрующих элементов наружу с очень высокой скоростью. Этот «пушечный» эффект мгновенно отрывает все загрязнения, которые скопились на дне фильтра. Операция промывки заканчивается опорожнением фильтра. Такой способ промывки позволяет использовать очень длинные фильтрующие элементы, исключая опасность необратимого загрязнения и обеспечивает минимальные потери воды.

Материалы для намывных фильтров применяют в зависимости от условий фильтрования. Для образования намывного слоя

Рис. 9.4. Намывной фильтр



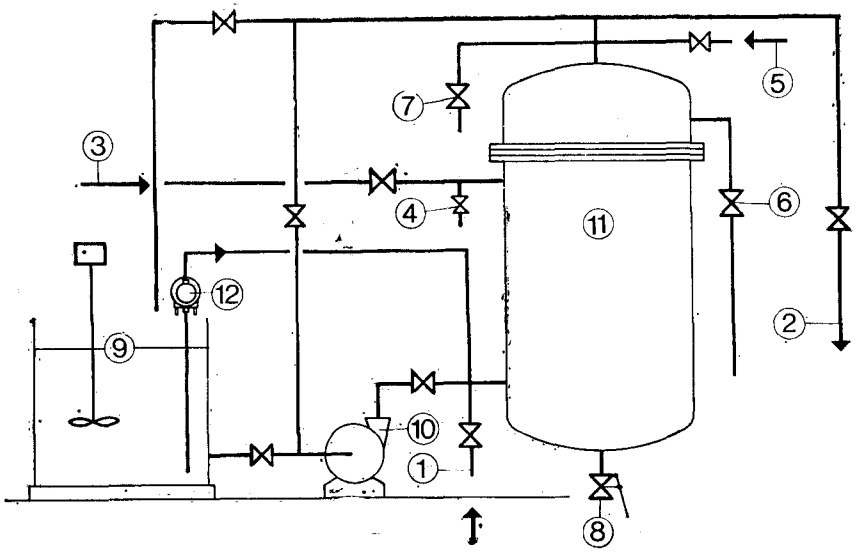


Рис. 9.5. Схема системы фильтрования на намывном фильтре с промывкой типа «Канон»:

1 — исходная вода; *2* — фильтрованная вода; *3* — сжатый воздух; *4* — клапан декомпрессии; *5* — промывная вода; *6* — клапан дренирования; *7* — в атмосферу; *8* — клапан опорожнения фильтра; *9* — приготовление суспензии фильтрующего порошка; *10* — насос подачи суспензии фильтрующего порошка на фильтр; *11* — фильтр; *12* — насос-дозатор для непрерывной подачи фильтрующего порошка

используют, главным образом, диатомит, целлюлозу, порошкообразный активный уголь и порошкообразные ионообменные материалы.

Целлюлоза в виде очень чистых волокон обладает такой же фильтрующей способностью, как и плотная фильтровальная бумага, но имеет очень низкую адсорбционную способность. Она не растворима ни в холодной, ни в горячей воде, но начинает гидролизоваться при температуре 85° С.

Диатомиты — окаменелые раковины морских организмов, они имеют очень малые размеры (5—100 мкм) и обладают некоторой адсорбционной способностью. В присутствии воды, содержащей коллоиды, диатомиты обеспечивают лучшее осветление, чем целлюлоза. Они также могут адсорбировать эмульгированные примеси (например, масла и углеводороды). Кремний в диатомитах слабо растворим в деминерализованной воде.

Порошкообразный активный уголь, нанесенный на поддерживающие материалы из целлюлозы или диатомита, благодаря своей высокой адсорбционной способности может быть использован для снижения цветности и практически полного удаления органических веществ растительного происхождения.

Порошкообразные катиониты и аниониты, смешанные в различных пропорциях, обеспечивают при фильтровании полное удаление коллоидных соединений железа или полную деминерализацию конденсатов для тепловых или атомных электростанций. В этом случае для нанесения слоя должны быть сделаны специальные устройства.

9.2.3.2. Дисковые или тарельчатые фильтры. Фильтрование через слой намывного материала может также осуществляться на дисковых или тарельчатых фильтрующих элементах (неподвижных или вращающихся), установленных горизонтально или вертикально. Диски или тарелки покрывают тканью, поддерживающей намывной слой. Существует много различных конструкций фильтров с плоскими или более сложной формы тарелками, сконструированными таким образом, чтобы получить равномерное распределение осадка. Обратная промывка с использованием только воды, даже если она сопровождается перемещением опорных конструкций намывного слоя, не столь эффективна, как промывка воздухом и водой.

9.3. ФИЛЬТРОВАНИЕ ЧЕРЕЗ ЗЕРНИСТЫЕ ФИЛЬТРУЮЩИЕ ЗАГРУЗКИ

9.3.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Фильтрование через зернистую загрузку применяют, когда количество взвешенных частиц достаточно велико, но размеры их относительно малы. Эффективность фильтрования повышается, если взвешенные вещества обладают способностью проникать внутрь загрузки на достаточную глубину и не забивают поверхность этой загрузки. Чтобы гарантировать получение фильтрата хорошего качества, необходимо очень тщательно выбирать размер зерен материала или материалов, из которых состоит загрузка, а также глубину слоя.

Быстрое или медленное фильтрование через зернистую загрузку может быть использовано без предварительной обработки воды, если желательно снизить только концентрацию взвешенных веществ, не изменяя цветности воды и содержания в ней органических веществ.

В ряде случаев для оптимального осветления воды скорым фильтрованием целесообразна предварительная обработка воды реагентами в сочетании с отстаиванием.

По мере загрязнения загрузка фильтров заполняется задержанной взвесью. Как только загрязнение фильтра станет чрезмерно большим или качество фильтрата начнет ухудшаться, фильтрующую загрузку следует промыть, чтобы восстановились ее первоначальные свойства. В противном случае эффективность работы фильтра будет быстро снижаться, что приведет к необходимости удаления этой загрузки из фильтра для ее полной очистки или замены.

Фильтр будет работать эффективно лишь в том случае, когда обеспечивается хорошее распределение в фильтрующей загрузке обрабатываемой и промывной воды, а также воздуха, если он используется. Способы сбора фильтрованной воды и распределения промывной воды в зависимости от типа дренажного устройства — важнейшие характеристики любого фильтра.

В зависимости от свойств задерживаемых частиц следует использовать однослойную загрузку различной высоты из однородного материала, загрузку из двух или более слоев из материала различной крупности (но каждый слой должен быть однородным) или одного или более слоев разнородных материалов с различной крупностью частиц.

Эффективность работы фильтра зависит также от способа регулирования расхода воды.

На фильтровальных станциях с индивидуальными системами регулирования для каждого фильтра общая система регулирования не должна вызывать резких колебаний расходов воды на каждом из фильтров во время изменения общего расхода на станции или во время промывок; в противном случае взвешенные вещества, задержанные загрузкой, могут быстро пройти через фильтр, вызвав преждевременный «проскок».

Следовательно, чтобы добиться хорошего качества фильтрования, необходимо учитывать многие факторы. Универсальных фильтров не существует, но для каждого конкретного случая можно подобрать соответствующий тип фильтра.

9.3.2. МЕДЛЕННОЕ ФИЛЬТРОВАНИЕ

Медленное фильтрование используют с целью очистки поверхностных вод без предварительной коагуляции или отстаивания. Коллоидные вещества коагулируются ферментами водорослей и микроорганизмов, которые задержаны фильтром (биологическая пленка).

Для достижения хорошего качества фильтрата поверхностные воды должны пройти три основные стадии фильтрования: через грубые фильтры, работающие при нагрузках 20—30 $м^3/(м^2 \cdot сут)$; предварительные, работающие при нагрузках 10—20 $м^3/(м^2 \cdot сут)$, и фильтры, работающие при нагрузках 3—7 $м^3/(м^2 \cdot сут)$.

При медленном фильтровании обеспечиваются достаточно низкие потери напора на каждой стадии. Фильтры очищают в среднем один раз в месяц, а грубые и предварительные фильтры промывают чаще, в зависимости от мутности фильтруемой воды. Поскольку непосредственно после промывки получается неудовлетворительный фильтрат, его следует сбрасывать в канализацию в течение нескольких дней до тех пор, пока на фильтре не образуется биологическая пленка.

Медленное фильтрование дает хорошие результаты по осветлению воды при условии, если она не содержит большого количества взвешенных веществ, и поддерживается низкая конечная скорость фильтрования. Однако когда содержание взвешенных веществ в исходной воде увеличивается, эффективность работы грубых и предварительных фильтров резко снижается, и мутность обработанной воды возрастает выше пределов, допускаемых стандартами, если скорость фильтрования не будет снижена. Эти фильтры также очень чувствительны к большим скоростям роста планктона, который может закальматировать их поверхность.

Если медленные фильтры используются для фильтрования воды из поверхностных источников, которая содержит много органических веществ и химических загрязнений, фильтрованная вода может иметь неприятный привкус.

В свое время возлагались большие надежды на применение медленных фильтров в качестве конечной ступени или для доочистки. Однако их биологическое действие по устранению всех микрозагрязнений (фенолов, детергентов, пестицидов) оказалось не достаточно эффективным: например, они могут удалять лишь около 50% хлорорганических пестицидов. Поэтому применение медленного фильтрования ограничивается процессами доочистки.

9.3.3. СКОРОЕ ФИЛЬТРОВАНИЕ

В процессе скорого фильтрования вода проходит через слой загрузки со скоростью 4—50 м/ч. При этом биологические процессы практически не играют роли в очистке; в некоторых случаях при ограниченных скоростях фильтрования, достаточном содержании растворенного кислорода и других благоприятных условиях для жизнедеятельности микроорганизмов в фильтрах частично протекают процессы нитрификации.

9.3.3.1. Основные способы. К ним относятся прямое фильтрование, без реагентной обработки осветляемой воды; фильтрование с коагулированием воды на фильтре без предварительного отстаивания и фильтрование после коагулирования и отстаивания воды.

Прямое фильтрование. При поверхностном фильтровании принято оценивать качество фильтра по количеству удаленных частиц (в %) в соответствии с их размерами. Этот критерий не применим при прямом фильтровании, поскольку он не позволяет учитывать различные механизмы фильтрования, которые изменяются в течение года в зависимости от температуры воды, свойств и размеров задерживаемых частиц, их концентрации в воде и способности задерживаться в загрузке, от содержания коллоидных веществ и микроорганизмов и т. д. Однако, когда характер изменения качества воды по сезонам года хорошо известен, можно предсказать содержание взвешенных веществ в фильтрате.

Наблюдения за эффективностью удаления взвешенных веществ показали, что она не остается постоянной в течение года при изменении качества фильтруемой воды и может изменяться от 50 до 95%.

Длительность фильтроцикла изменяется еще в большей степени, чем эффективность, и зависит от перечисленных выше факторов. Она также зависит от присутствия в воде частиц, способных забивать самые верхние слои фильтрующей загрузки. В некоторых случаях можно наблюдать изменение длительности фильтроцикла более чем в 10 раз в зависимости от конструкции фильтра. Прямому фильтрованию присущ наиболее широкий диапазон изменения скоростей фильтрования — от 4 до 25 м/ч с пиковыми значениями, превышающими 50 м/ч в некоторых случаях в зависимости от условий применения этого процесса. Вот почему выбор метода прямого фильтрования не может быть основан на анализах отдельных проб обрабатываемой воды. Для этого необходимо знать, как может изменяться качество воды в течение года. Только опытным путем или в результате тщательных исследований в каждом конкретном случае можно сделать правильный выбор из большого числа возможных вариантов.

Фильтрование с коагуляцией на фильтре. Зернистые фильтрующие материалы не задерживают коллоидные частицы. Чтобы получить очень чистую фильтрованную воду, перед фильтрованием необходимо осуществить коагуляцию.

В большинстве случаев применяют дозы коагулянта меньше необходимых для полной нейтрализации отрицательного заряда частиц взвеси в воде, поскольку образуется большое количество осадка, который быстро забьет фильтр.

Когда цветность и содержание взвешенных и органических веществ в фильтруемой воде незначительны, достаточно добавить небольшую дозу коагулянта (2—10 г/м³ при максимуме 15 г/м³, например, сернокислого алюминия), и если необходимо, нейтрализующие реагенты для корректировки pH и улучшения флокуляции.

Качество фильтрата в основном определяется дозой коагулянта. Введение флокулянта улучшает качество фильтрата незначительно. В основном флокулянты добавляют с целью продлить фильтроцикл за счет увеличения адгезии осадка и более прочного его закрепления на зернах фильтрующего материала. Фильтрующая загрузка, в которой поток ламинарен, действует как прекрасный флокулятор, обеспечивающий образование микроскопических хлопьев. Следует избегать слишком высоких доз вспомогательных флокулянтов, послольку они могут способствовать забиванию поверхностных слоев и, следовательно, быстрому блокированию фильтра.

Катионные полиэлектролиты действуют и как коагулянты, и как флокулянты благодаря их положительному заряду и молекулярной структуре. Они могут рассматриваться в качестве заменителей коагулянтов (сернокислый алюминий, хлорное железо), и флокулянтов (активная кремниевая кислота, анионоактивные или неионогенные полиэлектролиты) с тем преимуществом, что образуют меньше осадков.

По существу скорость фильтрования обусловлена количеством загрязнений в очищаемой воде и требуемой степенью очистки. В тех случаях, когда необходимо сохранить приемлемую длительность фильтроциклов и обеспечить надежную работу фильтра в периоды временного ухудшения качества фильтруемой воды, скорость фильтрования обычно составляет 4—10 м/ч. Однако она может быть значительно увеличена, если обрабатываемая вода мало загрязнена или если это позволяют требования к мутности фильтрованной воды. Например, при обработке воды, предназначенной для плавательных бассейнов, допускается скорость 40—60 м/ч при использовании очень небольших доз коагулянтов.

Однако применение этого процесса возможно лишь для обработки воды, степень загрязнения которой остается низкой в течение всего года, а цветность воды незначительна, но требуется ее снижение. Иначе установка не сможет работать в периоды

резкого повышения мутности воды, т. е. именно тогда, когда необходима наиболее эффективная очистка. В таких случаях для защиты фильтров перед ними предусматривают дополнительные отстойники.

Если речная вода с переменным содержанием взвешенных веществ предназначена для снабжения некоторых промышленных предприятий, то в процессе ее обработки иногда можно комбинировать грубое фильтрование с коагуляцией на фильтре.

Фильтрование воды после коагулирования и отстаивания. Хлопья, полученные при полной коагуляции воды, в значительной мере удаляются на стадии отстаивания, и поэтому на фильтрование поступает вода, содержащая лишь следы хлопьев, адгезионные свойства которых зависят от типа применяемых реагентов. При хорошем отстаивании фильтры работают в идеальных условиях, так как поступающая на них вода имеет почти постоянное качество и низкую концентрацию взвешенных веществ. В этом случае фильтрование является окончательной ступенью тонкой доочистки в тех случаях, если вода предназначается для хозяйственно-бытовых нужд, дальнейшей промышленной обработки или производства с высокими требованиями к качеству воды.

Скорости фильтрования зависят от требуемого качества осветленной воды и типа применяемого фильтра и могут составлять 5—20 м/ч.

Фильтрование сточных вод. Для третичной обработки (доочистки) сточных вод применяют два способа фильтрования: простое, когда для удаления загрязнений используются только физико-химические методы, и биологическое, когда физико-химическая очистка сопровождается биологической обработкой с целью снижения содержания растворенных органических веществ, характеризуемых величиной БПК. Эти два способа фильтрования можно применять после биологической или физико-химической очистки.

● Обычное фильтрование: ограниченно улучшает качество биологически очищенных сточных вод и позволяет достичь концентрации воды по $БПК_5$ и по взвешенным веществам 20 мг/л или менее.

Простое фильтрование также позволяет использовать доочищенные сточные воды в некоторых водоохлаждающих циклах.

Если фильтрование проводят с целью существенно снизить концентрацию взвешенных веществ, содержащихся в хорошо очищенных биологическим методом сточных водах, часто экономичнее добавить ступень фильтрования, чем расширять сооружения биологической очистки и в особенности отстойники.

Фильтрование осуществляется через загрузку из однородного песка с эффективным размером зерна 1—2 мм со скоростью 10 м/ч или более. Промывка ведется обратным током воды с подачей воздуха. В хорошо очищенной биологическим методом

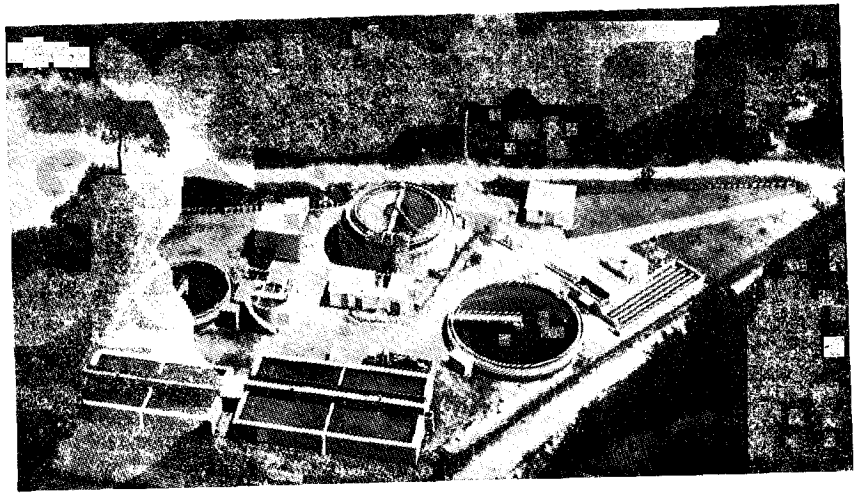


Рис. 9.6. Доочистка сточных вод фильтрованием через «Байолит». Станция очистки сточных вод в Ла-Тремблейд (Франция)

сточной воде можно ожидать снижения содержания взвешенных веществ на 70% и $БПК_5$ приблизительно на 40%.

● Биологическое фильтрование. В этом случае используется искусственный фильтрующий материал типа байолит, имеющий открытую пористую структуру, удобную для закрепления и развития бактериальной пленки. Чтобы обеспечить жизнедеятельность бактерий, перед фильтрованием осуществляется аэрирование воды. Так же как и на фильтрах с песчаной загрузкой, скорость фильтрования поддерживается в пределах 8—12 м/ч при эффективности очистки 80% по взвешенным веществам и 60% по БПК.

Другое преимущество этого метода состоит в том, что при заданных потерях напора задерживается большее количество взвешенных веществ на единицу объема фильтрующей загрузки, чем это может быть достигнуто с песком, имеющим равный эффективный размер зерна.

9.3.3.2. Фильтрующая загрузка

Физические свойства. Качество фильтрующего материала обусловлено следующими параметрами, точные определения и методы измерения которых рассмотрены в гл. 27:

● гранулометрическим составом, который определяется кривой, характеризующей массу материала, прошедшего через ячейки стандартной серии сит, выраженной в процентах;

● эффективным размером, определяемым как диаметр шара, соответствующий 10% на вышеупомянутой кривой; в комбинации со следующими двумя факторами он позволяет в определенной степени получить расчетное качество фильтрата;

● коэффициентом неоднородности, который представляет собой отношение диаметров зерен материала, соответствующих 60 и 10% по вышеупомянутой кривой;

● формой зерен, которая может быть либо грубой (дробленый материал), либо гладкой (речной и морской песок).

Чтобы получить одинаковое качество очищенной воды, материал грубой формы должен иметь меньший эффективный размер зерна, чем материал круглой формы.

При равных размерах зерен загрузки увеличение потерь напора будет меньше для материала грубой формы, чем для материала гладкой формы. Это объясняется тем, что материал грубой формы уплотняется не так легко, как гладкой формы, оставляя большее пространство для прохода воды;

● истираемостью; испытания на истираемость позволяют выбрать подходящий фильтрующий материал без риска, что в результате промывки может образоваться тонкая взвесь. Значение этого параметра зависит от схемы работы фильтра.

Рыхлые материалы в большинстве случаев не приемлемы, особенно когда фильтрование осуществляется сверху вниз и когда промывка фильтра производится только водой, поскольку мелкие частички забивают поверхность фильтрующего материала;

● стойкостью к воздействию кислот: большие потери материала, вызываемые воздействием кислоты, недопустимы, если существует вероятность того, что обрабатываемая вода содержит агрессивную углекислоту;

● плотностью зерен, составляющих фильтрующую загрузку;

● кажущейся насыпной плотностью на воздухе и в воде, которую определяют измерением объемов, занимаемых данной массой материала на воздухе и в воде.

Существуют и другие характеристики, свойственные только адсорбентам, таким как активный уголь; они будут рассмотрены при обсуждении вопросов, связанных с использованием этих материалов.

Материалы для фильтрующих загрузок. Впервые для фильтрования был использован кварцевый песок и до сих пор он остается основным материалом, который применяется для многих существующих фильтров.

Антрацит или мрамор можно использовать вместо песка, когда по условиям технологического процесса на производстве необходимо избежать наличия следов кремния в воде или когда эти материалы легче получить. Для некоторых методов обработки, таких как окончательная очистка природной воды или третичная очистка сточных вод и других, целесообразно применять материалы с большой удельной площадью поверхности, например вспененный асбест, байолит, пуццолан или другие подобные материалы.

В многослойных фильтрах песок можно комбинировать с антрацитом, керамзитом различной пористости и другими материалами, имея в виду, что они имеют низкую прочность и малую стойкость к воздействию кислот.

Наконец, для фильтрования можно использовать достаточно прочный активный гранулированный уголь в следующих случаях:

для замены песка (после обработки осветлением) с целью удаления остаточных хлопьев и в то же время для устранения загрязнений адсорбцией;

на второй ступени фильтрования только для «тонкой» доочистки или для дехлорирования.

Результаты многочисленных экспериментов показали, что при равных технологических условиях все фильтрующие материалы, не являющиеся пористыми сами по себе и не взаимодействующие химически с обрабатываемой водой или с веществами, растворенными в ней, ведут себя одинаково, если имеют одинаковый эффективный размер зерен и одинаковую форму; скорость фильтрования и качество фильтрата также идентичны.

Однако если в качестве фильтрующей загрузки применяются адсорбенты, такие как активный уголь, некоторые растворенные вещества дополнительно адсорбируются и по химическим показателям качество фильтрованной воды будет иным.

Выбор размера зерен для загрузки однослойных фильтров должен производиться с учетом глубины слоя фильтрующей загрузки.

Для заданной глубины слоя фильтрующей загрузки при коэффициентах неоднородности 1,2—1,6 и даже 1,8 область применения загрузок различной крупности может быть определена следующим образом:

от 0,3 до 0,5 мм (эффективный размер) сверхскорое фильтрование под давлением со скоростями 25—50 м/ч для фильтрования воды плавательных бассейнов. Прямое фильтрование воды с низким содержанием примесей. Фильтрование на передвижных установках с коагуляцией на фильтре сырой воды с мутностью менее 100 мг/л. Потери напора могут достигать нескольких десятых МПа. Загрязнение, в основном довольно быстрое, естественно, зависит от скорости фильтрования и глубины слоя загрузки. Промывка должна осуществляться только водой с интенсивностью, обеспечивающей расширение загрузки.

от 0,6 до 0,8 мм: фильтрование без предварительного коагулирования, с коагулированием на фильтре и без него, при фильтровании не очень загрязненной воды (мутность менее 50 мг/л).

Фильтрование осветленной воды с ограниченной скоростью (7 м/ч) на открытых фильтрах и при более высоких скоростях в напорных фильтрах с более высокими потерями напора; обычно работа загрязненного фильтра при максимальных потерях напора более 0,06 МПа вызывает ухудшение качества

фильтрованной воды. Фильтрующий материал такого размера может быть использован также для неоднородных загрузок, покоящихся на поддерживающих слоях при промывке фильтра только водой; он также может быть принят для однородных загрузок на ложном днище с водовоздушной промывкой фильтра:

- от 0,9 до 1,35 мм — этот стандартный размер зерен в Европе используют для фильтров с однородной загрузкой при фильтровании осветленной воды или воды с низкой мутностью с коагуляцией на фильтре; максимальные потери напора составляют 0,03 МПа. Загрузки этой крупности используются также для прямого фильтрования воды, не содержащей большого количества взвешенных веществ, и предназначенной для технического водоснабжения. Этот размер зерен идеально подходит для фильтров с ложным днищем и водовоздушной промывкой и позволяет работать со скоростями до 15—20 м/ч в зависимости от требуемого качества фильтрованной воды;
- от 1,35 до 2,5 мм — для удаления крупных частиц из промышленных сточных вод или для третичной очистки сточных вод, а также в качестве поддерживающего слоя для фильтрующих материалов с размером 0,4—0,8 мм;
- от 3 до 25 мм — используется исключительно для поддерживающих слоев.

Глубина однослойной фильтрующей загрузки. Установлено, что для фильтрующей загрузки с заданным размером зерен после того, как фильтр «созрел» при постепенном увеличении глубины фильтрующего слоя, мутность фильтрата снижается до некоторой глубины, после чего достигает стабильного значения. Это свидетельствует о том, что дальнейшее увеличение глубины не улучшает качества фильтрата. Этот предел определяет минимальную глубину слоя для чистого фильтра, обеспечивающую получение фильтрата наилучшего качества в соответствии с размером зерна используемого материала. Она дает минимальные потери напора для принятой скорости фильтрования.

Чтобы поддерживать приемлемую степень загрязнения фильтра глубину слоя следует увеличить. Время t_1, в течение которого качество фильтрата остается удовлетворительным (рис. 9.7), пропорционально глубине слоя.

Для максимального использования грязеемкости загрузки потери напора должны быть таковы, чтобы время t_2, необходимое для их достижения, было немного меньше времени t_1. Эта потеря напора есть максимальный предел, после которого произойдет «проскок» загрязнений. Чем мельче песок, тем выше это максимальное значение.

Следовательно, можно сформулировать общее правило: чем меньше крупность песка, тем меньше должна быть глубина слоя загрузки, но при этом тем больше будут средние и максимальные потери напора. Эти рассуждения легко подтверждаются стандартной кривой потерь напора. Например, фильтр имеет

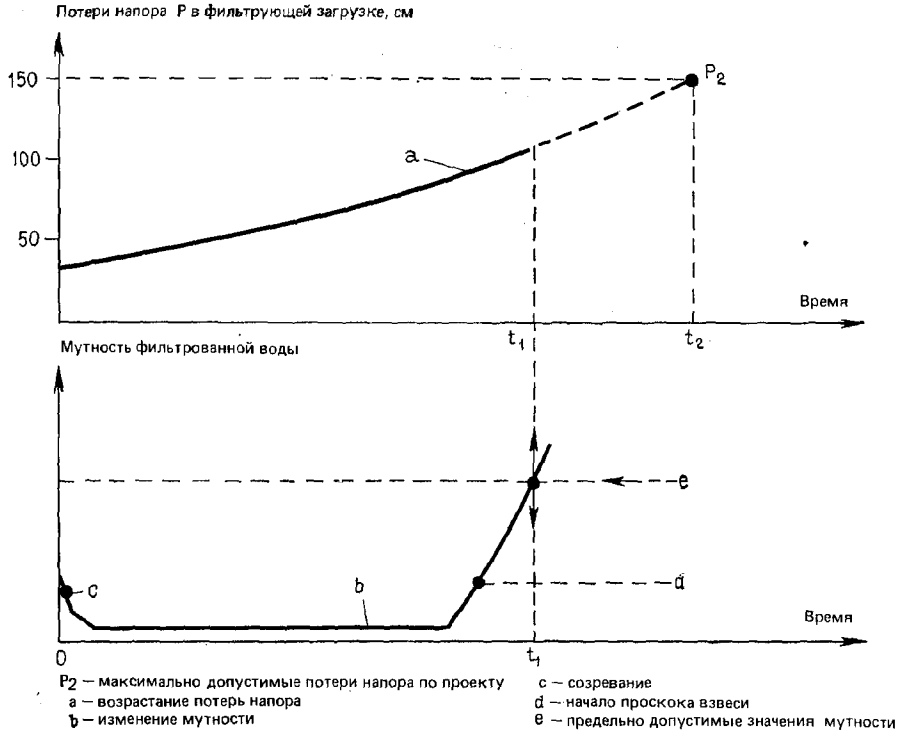


Рис. 9.7.

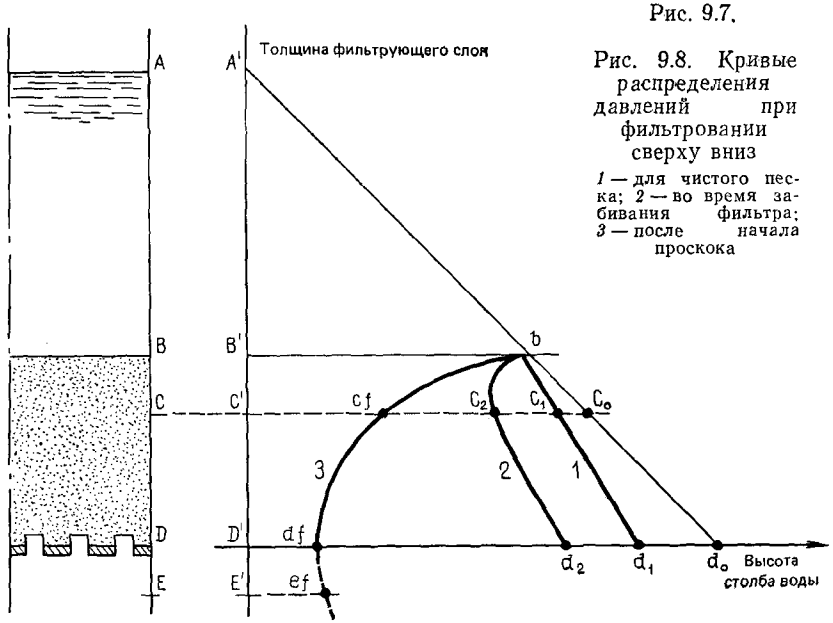


Рис. 9.8. Кривые распределения давлений при фильтровании сверху вниз

1 — для чистого песка; *2* — во время забивания фильтра; *3* — после начала проскока

по проекту максимальные потери напора в песке $P_2 = 1{,}5$ м. Верхняя кривая на рис. 9.7 показывает изменение потерь напора во времени: максимальное значение P_2 достигается через интервал времени t_2. Нижняя кривая показывает изменение мутности во времени. Максимальная допустимая мутность e достигается через интервал времени $t_1 < t_2$. Это значит, что фильтр запроектирован плохо и загрузка имеет недостаточную глубину, чтобы обеспечить его работу до достижения максимального значения потерь напора; глубина должна быть увеличена настолько, чтобы t_1 стало больше t_2.

Кривые на рис. 9.9 характеризуют работу открытого фильтра со слоем песка глубиной BD и глубиной воды AB. По оси ординат (правый график) отложены уровни давления, снятые в точках A, B, C, D и измеренные от днища фильтра D, а по оси абсцисс — значения давлений, обусловленные глубиной воды в том же масштабе, что и по оси ординат. Таким образом, в точке B фильтра в верхней части фильтрующей загрузки давление всегда равно глубине воды AB, отложенной в виде отрезка $B'b$. В точке C фильтрующей загрузки давление составляет величину AC, отложенную в виде отрезка $C'c_0$, если фильтр остановлен. Аналогично, статическое давление на уровне днища фильтра равно AD, отложенному как $D'd_0$.

Все точки, характеризующие статические давления на различных уровнях фильтра, укладываются на прямой $A'd_0$, проведенной под углом 45°.

При работе фильтра потери напора в промытой загрузке в соответствии с законом Дарси пропорциональны глубине слоя песка и скорости потока, принятой в данном случае постоянной. Давление в точке C фильтра станет равным $C'c_1$ при значении C_0c_1, выражающем потери напора в песке между уровнями B и C; аналогично для уровня днища давление в точке D станет равным $D'd_1$, потери напора в чистом песке будут d_0d_1.

Линия bc_1d_1 является прямой, поскольку отрезки c_0c_1 и d_0d_1 пропорциональны глубине слоя песка (по закону Дарси).

Когда загрузка полностью созрела, значения давлений $C'c_2$ и $D'd_2$ на различных уровнях песка дадут кривую bc_2d_2, отражающую давления в фильтре; она имеет криволинейный участок и прямолинейный, параллельный прямой bd_1, представляющей потери напора в незагрязненном фильтре. Точка c_2 показывает начало изменения потерь напора по линейному закону, а точка C — уровень C, на который загрязнения проникли в слой песка; ниже уровня C песок не загрязнен, поскольку потери напора изменяются линейно. Точка c_2 определяет глубину BC «фронта фильтрации» в рассматриваемый момент времени.

Минимальные значения глубины песка и потерь напора, характеризующие работу фильтра до его забивания, представлены поэтому отрезками BC и c_0c_2 соответственно.

Перемещение точки c_2 в процессе фильтрования отражает продвижение фронта фильтрации. На рис. 9.8 кривая $bc_fd_fe_f$, показывающая давление в различных точках фильтра, соответствует условиям, когда фильтр не дает больше чистого фильтрата, поскольку достигнуты максимальные потери напора P_2; эта кривая распределения давлений вплоть до отметки, соответствующей уровню днища фильтра, не имеет прямолинейного участка. Это означает, что фронт фильтрации достиг днища и начался проскок частиц.

Если использовать фильтр с большей глубиной песка, то кривая, представляющая давления в различных точках фильтра, при максимально допустимой потере напора станет линейной в точке e_f; это сразу определит минимальную глубину слоя песка DE, которую необходимо добавить, чтобы t_1 было равно t_2.

Таким образом, опыт показывает, что величины t_1, соответствующие различным глубинам данной песчаной загрузки, с приемлемой точностью пропорциональны соответствующей толщине слоя.

Размер зерен и глубина слоя загрузки в многослойных фильтрах. Эффективные размеры зерен фильтрующих материалов, используемых для фильтров с двумя, тремя или более фильтрующими слоями, должны находиться в некотором соотношении друг к другу. Это соотношение само по себе зависит от природы и диапазона размеров частиц, которые необходимо задерживать на фильтре, от плотности зерен фильтрующих материалов и применяемой технологии промывки.

Перед пуском в работу многослойного фильтра отдельные слои должны быть четко разграничены. Хотя некоторое взаимное проникновение материала загрузок из соседних слоев не является вредным, тем не менее коэффициент неоднородности каждого слоя должен быть, по возможности, минимальным (не более 1,5), чтобы предотвратить концентрирование очень тонких частиц на поверхности за счет явления гидравлической классификации в процессе промывки. Такая классификация приведет для каждого слоя к тем же самым осложнениям, связанным с забиванием поверхностных слоев, как это имеет место для фильтров с однослойной загрузкой, промываемых либо водой, либо водой с воздухом.

Для двухслойных фильтров эффективный размер песка, используемого для нижних слоев, обычно составляет 0,4—0,8 мм, у антрацита или пемзы — 0,8—2,5 мм.

Глубина слоя зависит от метода предварительной обработки воды, подаваемой на фильтры, скорости фильтрования, а также от природы и количества задерживаемых на фильтре частичек хлопьев. В первом приближении при прочих равных условиях общая глубина двухслойной загрузки соответствует примерно 70% эквивалентной глубины однослойной загрузки из

однородного материала, который сохраняет однородность после промывки.

Чтобы полностью использовать преимущества двухслойных фильтров, следует принимать $^1/_3$ глубины загрузки из песка и $^2/_3$ глубины из антрацита или другого материала, более легкого, чем песок. Что же касается фильтров, состоящих из большего числа слоев, то все зависит от способа устройства трех, четырех или даже пяти слоев. Разумеется, чем больше число слоев, тем большее значение приобретает выбор материала фильтрующих загрузок и метода промывки.

Фильтрование сверху вниз через однослойную неоднородную загрузку. Для обработки питьевой воды иногда используют песчаные фильтры с эффективным размером зерен загрузки 0,55 мм; промывка осуществляется обратным потоком воды при скорости 35—40 м/ч, чтобы обеспечить необходимую степень расширения слоя. В результате промывки песок, крупность которого была однородна по высоте после его первоначальной загрузки в фильтр, подвергается гидравлической классификации. При этом наиболее мелкие частицы размером 0,3 мм располагаются на поверхности, а наиболее крупные — 0,9 мм в нижней части слоя. Таким образом, фильтрующий материал становится неоднородным и не может быть использован на всю глубину загрузки. При этом происходит следующее: частицы взвеси задерживаются на глубине первых нескольких сантиметров загрузки, где они создают очень большие местные потери напора, которые, по-видимому, сокращают длительность фильтроцикла и могут вызвать дегазацию воды из-за падения давления ниже атмосферного. На рис. 9.9 представлена эпюра давлений внутри фильтрующей загрузки глубиной 0,6 м со слоем воды над ней 1,5 м и потерями напора (2 м) в песчаной загрузке, обусловленными забиванием фильтра. Заштрихованная зона обозначает слой песка, находящийся под вакуумом к концу фильтроцикла. Загрязнению подвергается только слой загрузки BC.

Эти недостатки были учтены при разработке новых конструкций фильтров с однородными слоями загрузок из зерен более крупных размеров и многослойных фильтров.

Фильтрование сверху вниз через однородный слой. Фильтры, в которых эффективный размер зерен фильтрующего материала одинаков по всей глубине фильтрующей загрузки как до промывки, так и после нее, считаются фильтрами с однородной загрузкой. Они промываются одновременно и водой, и воздухом, а затем промываются без расширения загрузки.

На первой стадии при обратной промывке водой без расширения фильтрующей загрузки в фильтр одновременно подают воздух; однако нередко, если расход промывной воды слишком мал, часть песка остается в плотном состоянии. При подаче воздуха обеспечивается тщательное перемешивание песка, который после такой промывки остается полностью однородным,

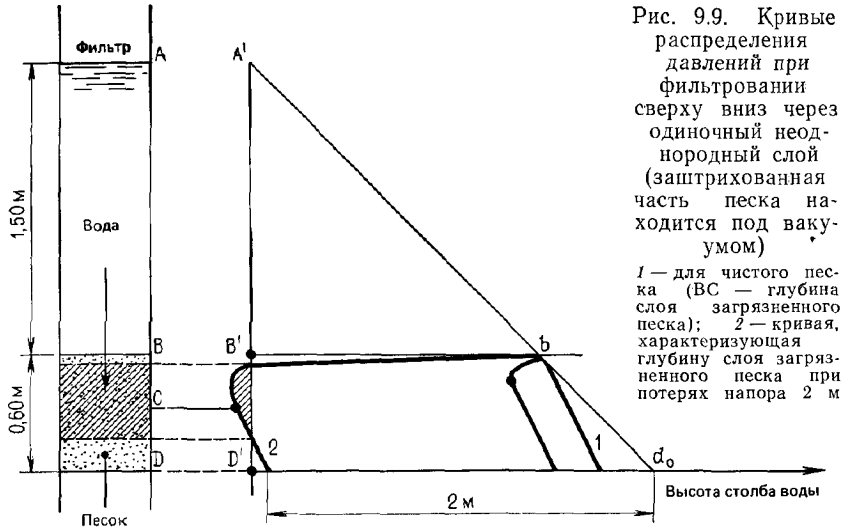


Рис. 9.9. Кривые распределения давлений при фильтровании сверху вниз через одиночный неоднородный слой (заштрихованная часть песка находится под вакуумом)

1 — для чистого песка (BC — глубина слоя загрязненного песка); *2* — кривая, характеризующая глубину слоя загрязненного песка при потерях напора 2 м

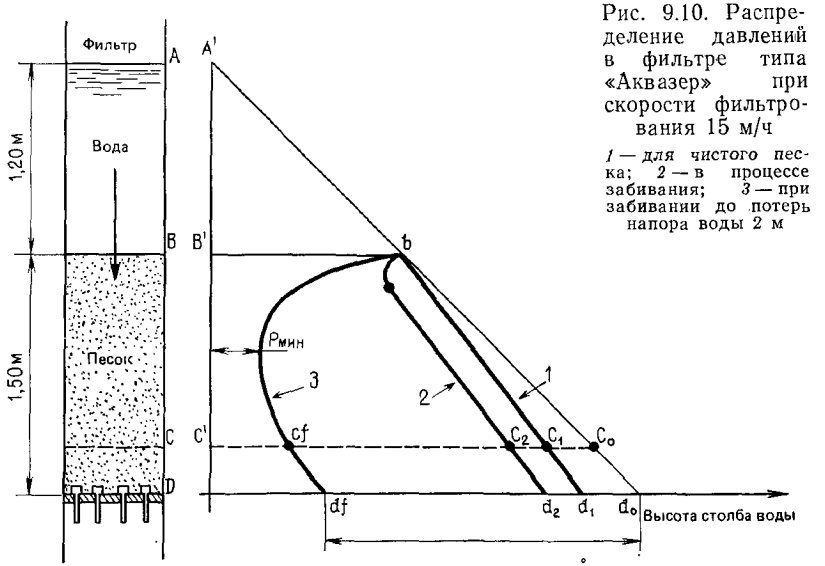


Рис. 9.10. Распределение давлений в фильтре типа «Аквазер» при скорости фильтрования 15 м/ч

1 — для чистого песка; *2* — в процессе забивания; *3* — при забивании до потерь напора воды 2 м

как это было до начала промывки. Во время второй стадии промывки (предназначенной для удаления из фильтра загрязнений, отделенных от песка и находящихся в поверхностном слое воды) практически не происходит расширения загрузки, необходимого для того, чтобы предотвратить гидравлическую классификацию песка, который уже хорошо перемешан на предыдущей стадии.

Поэтому во время фильтрования сверху вниз через однородный слой загрязнения вместо того, чтобы забивать поверхностные слои, как это имеет место в фильтрах с неоднородной загрузкой, проникают в ее толщу. Кроме того, использование более грубого песка снижает риск образования вакуума.

На рис. 9.10 показана кривая давления в открытом фильтре «Аквазер» типа V (см. с. 293), работающем при скорости фильтрования 15 м/ч при глубине однородного фильтрующего слоя песка 1,5 м с эффективным размером зерен 0,95 мм, и при слое воды над поверхностью песка 1,2 м; потери напора, предусмотренные только на забивание загрузки, составляют 2 м. Кривая bc_fd_f характеризует давление в фильтре при загрязненной загрузке. Ни в одной точке этой кривой давление не падает ниже атмосферного. Точка *C* показывает окончательную границу распространения фронта фильтрации. При этом осталось около 30 см чистого песка, что является необходимым резервом.

Фильтрование через многослойную загрузку может быть осуществлено в любом направлении: сверху вниз или снизу вверх. Такое фильтрование применяют с целью избежать недостатков, присущих фильтрам с неоднородным слоем, т. е. вероятности поверхностного забивания и недостаточных скоростей фильтрования.

● Фильтрование сверху вниз. Чтобы увеличить скорость фильтрования и продолжительность рабочего цикла фильтров, часть мелкого песка заменяют более легким материалом с эффективным размером зерен большим, чем песок, расположенный внизу. Обычно таким более легким материалом служит антрацит, но могут быть также использованы пористый сланец, вулканические материалы или пластмассы.

Эффективный размер зерен антрацита в 2—3 раза больше, чем у зерен песка.

Еще в 1880 г. Смит, Кучет и Монфорт запатентовали идею о том, что загрязнения должны иметь возможность проникать на всю глубину более крупной загрузки верхнего слоя, позволяя тем самым нижнему слою осуществлять функции более полной доочистки и защитные функции. При очистке некоторых видов природных вод каждый из слоев может также работать на задержание взвешенных веществ с размерами, соответствующими тем, для которых обычно используется данный тип загрузки.

Размер зерен каждого из фильтрующих слоев выбирают таким образом, чтобы каждый слой имел одинаковую степень расширения при одинаковых расходах промывной воды и чтобы эти слои могли таким образом быть разделены перед началом фильтрования.

Коэффициент неоднородности различных загрузок (см. с. 261), и особенно для материала, расположенного в верхнем слое, должен быть по возможности минимален (не более 1,5), чтобы предохранить поверхность каждого слоя загрузки от забивания.

Скорость обратной промывки следует увеличивать пропорционально размеру зерен загрузки и температуре воды. Необходимо обеспечить возможность расширения каждого слоя по крайней мере на 10—15%.

В ряде случаев необходимо делать запас для согласования этой скорости с температурой таким образом, чтобы постоянно поддерживать адекватную степень расширения без риска потери фильтрующего материала с промывной водой.

Оборудование фильтров этого типа включает не только устройство для очистки фильтра одним воздухом, но и аппаратуру для контроля и регулирования расхода промывной воды. Кромки каналов, используемых для отвода промывной воды, должны иметь форму, позволяющую сократить до минимума потери наиболее легкой фракции загрузки.

Существуют фильтры с загрузкой из трех и четырех слоев. В этих фильтрах улучшаются условия проникания загрязнений в глубину загрузки, хотя это и налагает множество условий на выбор крупности загрузки и применяемую технологию промывки.

Использование многослойных фильтров дает возможность фактически увеличить скорости фильтрования и длительность фильтроцикла по сравнению с фильтрами с неоднородным слоем мелкого песка, однако не устраняет недостатков, связанных с промывкой этих фильтров.

Кроме того, из-за потери фильтрующего материала во время промывок необходимо ежегодно добавлять 5—7% этого материала, образующего верхний фильтрующий слой.

Преимущества многослойных фильтров не столь существенны по сравнению с однослойными фильтрами с однородным слоем песка. Суть в том, что однослойный фильтр с однородным слоем работает при тех же скоростях фильтрования, с той же продолжительностью фильтроцикла и с теми же предельными потерями напора, что и многослойный фильтр. Для того, чтобы обеспечить задержание в толще загрузки такого же количества загрязнений на 1 м^2 поверхности фильтра, в нем используется однородный песок немного более мелкого размера, чем антрацит в двухслойном фильтре в сочетании с большей глубиной. Что касается промывки, то преимущества имеет однослойный песчаный фильтр с водовоздушной промывкой, в котором обеспечивается равномерная отмывка загрузки и потери песка весьма малы.

С другой стороны, применение многослойного фильтра особенно желательно с целью задержания очень небольших частиц в виде хлопьев с низкой адгезионной способностью, аналогичных тем, которые встречаются при удалении железа и марганца.

● Фильтрование снизу вверх. В этой системе используют фильтрующую загрузку с убывающей снизу вверх крупностью зерен,

чтобы обеспечить проникание загрязнений в глубину слоя загрузки, максимально использовать ее массу и увеличить длительность фильтроцикла.

Первая важная задача, связанная с эксплуатацией фильтров этого типа, которые в основном промываются водой с воздухом, состоит в том, чтобы обеспечить равномерное распределение потока фильтруемой воды. Это достигается путем пропускания воды через отверстия или сопла, которые не должны забиваться загрязнениями или обрастать планктоном, находящимися в обрабатываемой сырой воде.

Вода, проходящая через фильтрующую загрузку снизу вверх, взвешивает песок и тем сильнее, чем больше потери напора; при этом создаются местные области расширения мелкого песка в верхней части фильтрующей загрузки, которая неожиданно прорывается на несколько минут перед тем, как возобновить свою фильтрующую функцию. Чтобы стабилизировать мелкий песок, в верхней части загрузки были установлены на ребро горизонтальные решетки из плоских стержней. Однако такая решетчатая система не полностью устраняет нежелательное резкое расширение загрузки, которое возникает в основном тогда, когда скорость фильтрования увеличивается в результате быстрого или значительного увеличения расхода фильтруемой воды. Чтобы предотвратить в дальнейшем это нежелательное явление, необходимо увеличить глубину слоя песка только с целью пригрузки. На каждом фильтре следует предусмотреть оборудование для измерения расхода и объема профильтрованной воды таким образом, чтобы необходимость промывки можно было определять на основе этого объема раньше, чем потери напора достигнут предельного значения. Фильтры необходимо тщательно регулировать, чтобы иметь уверенность, что скорость потока будет меняться незначительно.

Учитывая все эти положения, фильтры такого типа не следует использовать в тех случаях, когда необходимо получить исключительно надежные результаты фильтрования.

● Двухпоточное фильтрование. Другой способ стабилизации слоя тонкого песка — отвод фильтрованной воды через погружные трубы, расположенные в средней части верхнего более тонкого песка, и подвод выше этого слоя предварительно профильтрованной воды из более грубого нижнего слоя. Это значит, что давление, приложенное выше слоя песка, равно давлению, которое его взвешивает (см. с. 283).

При неоднородном слое песка забивание происходит главным образом на уровне, соответствующем размерам задерживаемой взвеси в зоне очень ограниченной глубины, поскольку ниже этой зоны песок слишком крупен, чтобы обеспечить эффективное фильтрование, а выше — слишком мелок. Кроме того, фильтруемый поток в верхней зоне очень невелик, поскольку все мелкие частицы собираются на поверхности.

Таким образом, в двухпоточной фильтровальной системе только однородный песок позволяет осуществить проникание задерживаемых загрязнений в толщу загрузки. В этом случае обеспечивается нормальное фильтрование в обоих направлениях внутри однородного верхнего слоя с расходом воды почти вдвое большим, чем для однопоточного фильтра.

И, наконец, система промывки должна быть запроектирована таким образом, чтобы удалялся весь осадок, сконцентрированный в нижней части грубого фильтровального слоя, наверх через верхний песчаный слой, и этот слой поддерживался однородным с целью предотвращения проникновения тонкой взвеси к поверхности и блокировки фильтрования сверху вниз.

9.3.4. ПРОМЫВКА

Промывка — весьма ответственная операция. Если она недостаточно эффективна, то постепенно происходит забивание некоторых частей фильтрующей загрузки и снижение площади сечения прохода воды. Значительно быстрее возрастают потери напора и фильтрование в некоторых зонах ускоряется и становится менее эффективным. В этом случае фильтрующая загрузка может стать средой для размножения микроорганизмов, что отрицательно сказывается на качестве и вкусе воды.

9.3.4.1. Методы промывки. Фильтрующий материал промывают потоком воды, в большинстве случаев направленным снизу вверх, чтобы отделить задержанные загрязнения от материала загрузки и направить их в отводной канал; одновременно фильтрующий материал должен быть перемешан в потоке воды. Существует много различных методов промывки, но здесь рассмотрим лишь некоторые из них.

Промывка одной водой с расширением фильтрующей загрузки. Восходящий поток воды должен быть достаточен для того, чтобы вызвать расширение фильтрующего материала, т. е. увеличить его объем по крайней мере на 15%.

Поскольку вязкость воды зависит от температуры, желательно предусмотреть систему измерения температуры и регулирование расхода промывной воды таким образом, чтобы поддерживать во времени постоянную степень расширения. В этом случае во взвешенном слое возникают конвекционные токи. В одних зонах фильтрующий материал движется сверху вниз, в других — вверх, при этом часть компактного слоя осадка выносится глубоко вниз, образуя в результате вихревого движения твердые и объемные грязевые шары. Это явление можно преодолеть путем разрушения поверхностной пленки при помощи мощных струй воды, подаваемых под большим давлением через неподвижные или вращающиеся сопла (поверхностная промывка). Данный метод требует точного измерения степени расширения фильтрующего материала. Его основной недостаток — гидравлическая классификация и концентрирование наиболее тонкого фильтрующего материала на поверхности. Поэтому он мало подходит для фильтрования сверху вниз.

Водовоздушная промывка без расширения загрузки в настоящее время находит все более широкое распространение. Этот метод позволяет использовать такую скорость обратной промывки, при которой не происходит расширение слоя песка, поскольку перемешивание этого песка осуществляется при помощи воздуха. Песок остается однородным, а поверхностная пленка полностью разрушается воздухом. В результате промывки «грязевые шары» практически не могут образоваться.

Во время продувки воздухом расход промывной воды может изменяться в широких пределах, но он не должен падать ниже 5 м³/ч на 1 м². Чем выше расход промывной воды, тем быстрее и эффективнее происходит промывка. Максимальный расход будет зависеть от материала загрузки и параметров фильтра.

Как только загрязнения будут удалены из фильтрующей загрузки и собраны в слое воды между поверхностью песка и лотком для отвода промывной воды, необходимо осуществить «прополаскивание», т. е. слой загрязненной воды заменить чистой водой. После прекращения подачи воздуха промывку можно осуществлять различными методами:

1) продолжать промывку водой с постоянной скоростью до тех пор, пока загрязненная промывная вода не станет чистой. Необходимое для этого время обратно пропорционально расходу воды, который никогда не должен быть ниже 12 м³/(м²·ч), и пропорционально глубине слоя воды над фильтрующим материалом;

2) увеличить расход воды во время промывки по крайней мере до 15 м³/(м²·ч);

3) очистить поверхность фильтра горизонтальным потоком сырой или осветленной воды совместно с обратной промывкой;

4) сбросить слой загрязненной воды и очищать поверхность фильтрующего материала способами, указанными выше.

Последовательная промывка воздухом и водой используется в тех случаях, когда свойства фильтрующего материала не позволяют использовать воздух и воду одновременно из-за риска потери фильтрующего материала с промывной водой. Этот метод применяют для фильтрующих загрузок из очень тонкого песка или для материалов с низкой плотностью, таких как антрацит или активный уголь.

На первой стадии промывки используют только воздух, чтобы отделить задержанные загрязнения от материала загрузки. На второй стадии применяют обратную промывку водой со скоростями достаточно высокими, чтобы вызвать расширение фильтрующей загрузки, что позволяет удалить загрязнения, уже отделенные от загрузочного материала на первой стадии. В тех случаях, когда загрязнения тяжелые или их трудно удалить,

эти операции могут быть повторены несколько раз (пульсационная промывка).

Промывка фильтров, применяемых для очистки сточных вод, имеет свои особенности, если речь идет о биологических фильтрах. Может возникнуть необходимость повторить операции промывки несколько раз, если нужно удалить органические осадки, которые гораздо труднее отмываются от фильтрующей загрузки, чем неорганические. Скорость подачи воздуха и промывной воды необходимо выбирать с учетом свойств фильтрующих материалов.

Промывная вода, содержащая загрязнения, подается в начало сооружений для ее обработки.

9.3.4.2. Частота промывок. Она зависит от природы фильтруемой воды. На практике за критерий принимаются потери напора.

Промывку начинают, как только они достигают заданного предела, неправильно называемого максимальным загрязнением. Фактически эти потери напора зависят как от степени загрязнения фильтра, так и от скорости фильтрования. Название «максимальное загрязнение» можно применять для контроля забивания фильтра только в том случае, если расход постоянен.

Однако учитывать расход нет необходимости при условии, что его максимальное значение не превышается и не изменяется существенно в течение фильтроцикла. Максимальные потери напора определяются на основе требуемого качества фильтрованной воды при условии, что оно остается в заданных пределах.

Если скорость фильтрования существенно изменяется, лучше всего выводить фильтр на промывку после фильтрования некоторого объема воды, определяемого на основе качества фильтрата в конце фильтроцикла в рабочих условиях.

9.3.4.3. Потребление воды для промывки. Количество воды, потребляемой для промывки существенно зависит от характера и массы взвеси, задержанной на 1 м³ фильтрующей загрузки. Совместное применение воздуха и осветленной воды дает возможность снизить расход промывной воды примерно на 20—30% по сравнению с промывкой одной водой. Количество воды, потребляемой для промывки, будет тем больше, чем:

больше слой воды над поверхностью фильтрующего материала;

меньше интенсивность промывки (одной водой);

больше расстояние между лотками для отвода промывной воды;

больше количество удаляемого осадка;

выше адгезионные свойства и плотность осадка.

Потребление промывной воды также возрастает с применением поверхностной напорной промывки.

9.3.4.4. Выбор типа дренажных колпачков для промывки скорых фильтров. В зависимости от применяемого метода промывки колпачки для оборудования днища фильтров бывают двух типов: для промывки одной водой и для водовоздушной промывки.

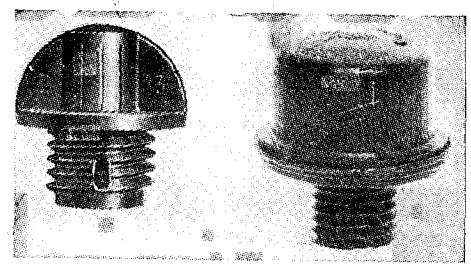


Рис. 9.11. Пластмассовый колпачок типа Д13

Рис. 9.12. Пластмассовый колпачок типа Д15

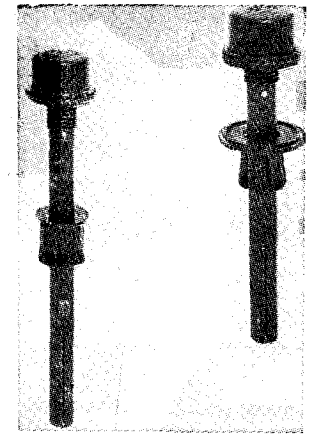


Рис. 9.13. Пластмассовый колпачок типа Д20 с уплотняющим кольцом для установки на бетонном днище

Рис. 9.14. Пластмассовый колпачок типа Д25 с уплотнительным кольцом для установки на металлических опорных плитах

Колпачки для промывки одной водой различаются по форме, ширине щелей и материалам, из которых они изготовлены.

Колпачки для водовоздушной промывки применяют двух типов:

если воздух распределяется разветвленными перфорированными коллекторами, расположенными под днищем, то используют колпачки типа Д13 (рис. 9.11), подающие водовоздушную смесь;

если воздух распределяется с помощью воздушной подушки, то в этом случае применяют колпачки с длинным стержнем (рис. 9.13 и 9.16), которые обеспечивают прекрасное однородное распределение воздуха и воды.

На рис. 9.17 показано поперечное сечение колпачка с длинным стержнем, установленного на бетонном днище, в момент цикла промывки с воздухом и водой. Этот колпачок имеет головку со щелями, достаточно узкими, чтобы не допускать проникания фильтрующего материала, и стержень, состоящий из трубки с отверстием в верхней части и щелью в нижней.

Воздух, подаваемый под днище, образует воздушную подушку, которая обеспечивает проникание воздуха в колпачки через отверстия и щели и хорошее качество водовоздушной эмульсии, равномерно распределенной по всей поверхности фильтра.

Это особенно эффективная система, которая позволяет сэкономить расход воды на промывку. Она с успехом может быть использована даже для фильтров с глубиной слоя загрузки более 2 м.

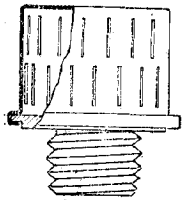


Рис. 9.15. Схема металлического колпачка типа Д50

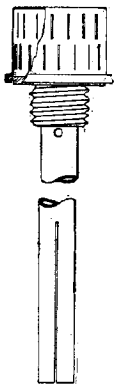


Рис. 9.16. Схема металлического колпачка типа Д50 с длинным стержнем

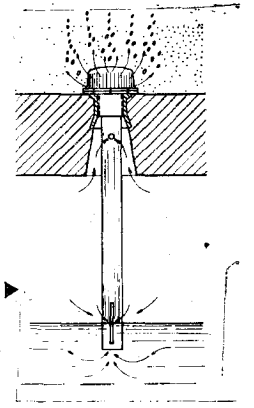


Рис. 9.17. Колпачок, показанный во время промывки воздухом и водой

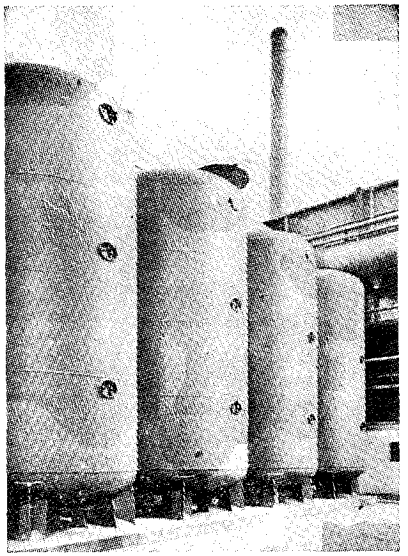


Рис. 9.18. Четыре из восьми тройных колонн диаметром 3 м, используемых для очистки сточных вод прокатных станов от окалины. Полный расход 3000 м³/ч. Металлургический завод Сидлор в г. Ромбас (Франция)

9.3.4.5. Количество взвешенных веществ, которое можно удалять фильтрованием. Взвешенные вещества задерживаются между зернами фильтрующего материала. Поскольку всегда должно оставаться свободное пространство для просачивания воды, осадок, как правило, не должен занимать более $^1/_4$ объема пор в фильтрующей загрузке. Поскольку независимо от размера зерен на 1 м³ фильтрующего материала приходится около 450 л пустот, объем, который может быть использован для задержанного осадка, составляет около 110 л при условии, что эффективный размер зерна соответствует природе задерживаемых частиц.

Если взвешенные вещества образованы коллоидными хлопьями, их содержание по сухому веществу не превышает 10 г/л; в этом случае количество загрязнений, которое может быть удалено 1 м³ материала загрузки, составит не более $110 \times 10 = 1100$ г. Это значение возрастает, когда хлопья содержат плотные минеральные материалы (глина, карбонат кальция). Для осадка с концентрацией 60 г/л по сухому веществу это количество будет равно $110 \times 60 = 6600$ г.

И, наконец, намного более высокие значения могут быть получены при фильтровании промышленных сточных вод (окалина прокатных станов, соли свинца и бария и др.).

Эти значения свидетельствуют о предельно допустимом содержании взвешенных веществ в сырой воде, подаваемой на фильтры после того, как скорость фильтрования и длительность фильтроцикла между двумя промывками уже определены.

Например, фильтр с глубиной загрузки 1 м, работающий при скорости фильтрования 10 м/ч и требующий промывки через каждые 8 ч (80 м³ воды на 1 м³ фильтрующей загрузки между операциями промывки), не может справиться с количеством сфлокулированных взвешенных веществ более $1100/80 = 13{,}75$ мг/л, или $6600/80 = 82{,}5$ мг/л минеральных взвешенных веществ. Для взвешенных веществ, содержащихся в речной воде, эти цифры будут находиться в интервале между двумя вышеприведенными значениями.

9.4. НАПОРНОЕ ФИЛЬТРОВАНИЕ

Для напорного фильтрования используют фильтры, обычно изготовленные из металла.

9.4.1. ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ФИЛЬТРЫ, ПРОМЫВАЕМЫЕ ТОЛЬКО ВОДОЙ

Эти фильтры содержат фильтрующие материалы, размер зерен которых и плотность соответствуют скоростям обратной промывки, обеспечивающим расширение загрузки. Фильтрующая загрузка уложена на ряд поддерживающих слоев из материалов с крупностью зерен, постепенно возрастающей сверху вниз, а профильтрованная вода собирается в разветвленных перфорированных коллекторах, вмонтированных в поддерживающий слой с наиболее крупной загрузкой.

Эти фильтры чаще всего загружают одним слоем песка или антрацита. Однако могут применяться и многослойные загрузки: например тонкий песок внизу и более крупный антрацит наверху. В зависимости от крупности зерна фильтрующей загрузки скорость фильтрования может изменяться от 5 до 50 м/ч.

Для фильтров этого типа максимальные потери напора в конце фильтроцикла определяются прежде всего крупностью загрузки фильтрующего слоя и скоростью фильтрования; они могут изменяться от 0,02 до 0,2 МПа. Интенсивность промывки также обусловлена размерами зерен и должна обеспечивать расширение загрузки на 15—25%.

Для песчаной фильтрующей загрузки рекомендуется следующая интенсивность промывки:

Интенсивность промывки, м/ч	25—30	40—50	55—70	70—90
Эффективный размер зерна, мм	0,35	0,55	0,75	0,95

Интенсивность промывки может быть легко проконтролирована (что весьма существенно) путем установки измерительного водослива в камере промывной воды. Одновременно можно определять качество сбрасываемой промывной воды и в соответствии с этим выбирать длительность промывки. Она будет изменяться от 5 до 8 мин в зависимости от глубины слоя песка и природы задержанных веществ.

9.4.2. ВЕРТИКАЛЬНЫЕ ФИЛЬТРЫ С ПРОМЫВКОЙ ВОЗДУХОМ И ВОДОЙ

9.4.2.1. Фильтры с одним однородным слоем с промывкой одновременно воздухом и водой. Фильтрующую загрузку, однородную по глубине, загружают на перфорированное металлическое днище с кольцами, в которые ввертывают металлические или пластмассовые колпачки в зависимости от типа и температуры фильтруемой жидкости.

Это обычные песчаные фильтры; они промываются обратным током воды с пониженной интенсивностью и подачей воздуха и последующей промывкой нормальным расходом фильтрованной воды.

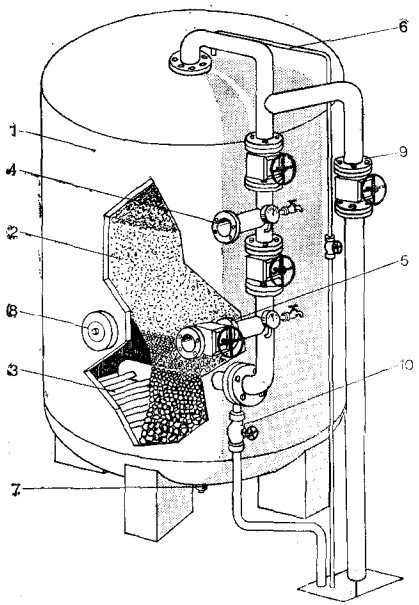


Рис. 9.19. Схема закрытого напорного фильтра с обратной промывкой водой

1 — корпус с фильтра; *2* — фильтрующий материал; *3* — система сбора воды; *4* — подача сырой воды; *5* — отвод фильтрованной воды; *6* — отвод воздуха; *7* — штуцер опорожнения; *8* — люк; *9* — выпуск промывной воды; *10* — дополнительная промывка, если это необходимо

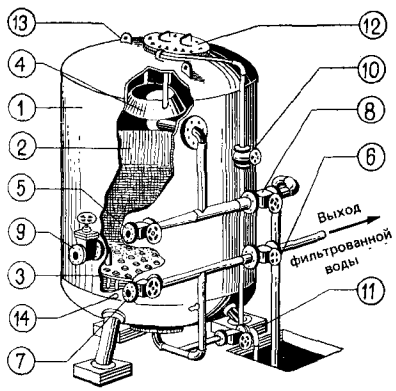


Рис. 9.20. Фильтр типа *FV2*

1 — корпус фильтра; *2* — фильтрующая загрузка; *3* — днище с колпачками; *4* — отражательный конус на впуске; *5* — подача сырой воды; *6* — отвод фильтрованной воды; *7* — подача промывной воды; *8* — отвод промывной воды; *9* — подача воздуха; *10* — выпуск воздуха; *11* — дренирование и сброс воздуха; *12* — люк; *13* — монтажные приспособления

Фильтры этого типа имеют следующие характеристики.

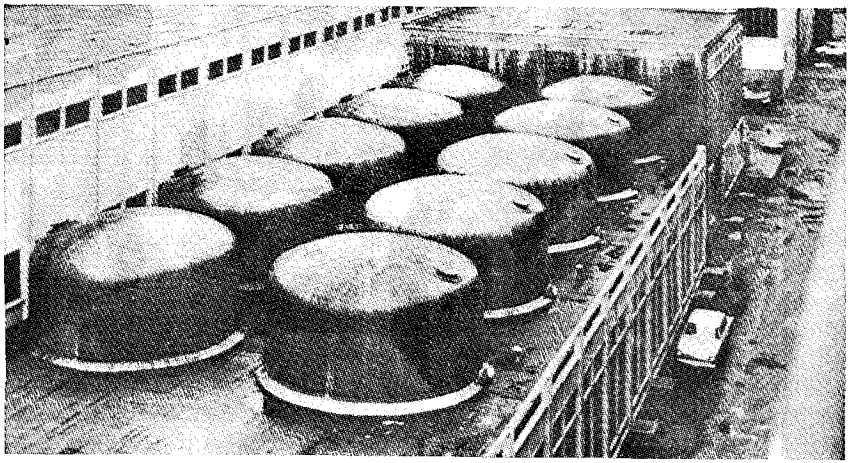
Эффективный размер зерен, мм	0,7—1,35
Расход воздуха, $м^3/(м^2 \cdot ч)$	50
Интенсивность промывки во время подачи воздуха, $м^3/(м^2 \cdot ч)$	5—7
Нормальная интенсивность промывки одной водой, $м^3/(м^2 \cdot ч)$	15—25
Потери напора в конце фильтроцикла, МПа	0,01—0,04

Глубина слоя загрузки должна соответствовать скорости фильтрования и количеству взвешенных веществ, которые следует задержать. Скорости фильтрования в большинстве случаев составляют 4—20 м/ч. В промышленных условиях этот фильтр может быть использован с загрузкой глубиной 1—2 м из песка с эффективным размером зерен 0,65—2 мм. Скорости иногда намного превышают применяемые для осветленной воды: 20—40 м/ч при глубоком слое песка с эффективным размером 1,8—2 мм для воды, содержащей оксиды металлов, и 30—60 м/ч через слой тонкого песка (эффективный размер зерен 0,65 мм) для обработки глубинной морской воды.

Эти фильтры, удобные для установки сериями, изготовляют больших диаметров. Они просты в работе, надежны, имеют минимальный расход промывной воды.

9.4.2.2. Однослойные и двухслойные фильтры с промывкой последовательно воздухом и водой. Рассмотренные вертикальные фильтры могут быть переоборудованы для загрузки в них одного слоя легкого фильтрующего материала (например, антрацита или гранулированного активного угля) или двух слоев, состоящих из разных материалов. Чтобы обеспечить необходимую степень расширения слоев, для этих материалов требуется применять другие методы промывки, чем для фильтров с одним однородным слоем. После того как уровень воды на фильтре понижен до верхней кромки верхнего слоя, операцию промывки начинают с продувки фильтра воздухом, что приводит к перемешиванию загрязнений и тонких фракций загрузки нижнего слоя со всем слоем фильтрующей загрузки. На второй стадии фильтрующий материал промывают обратным потоком воды большой интенсивности. Цель этой операции состоит в том, чтобы разрыхлить загрузку и таким путем удалить загрязнения, обеспечив гидравлическую классификацию слоев фильтрующей среды.

Скорость обратного потока фильтрованной воды выбирают в соответствии со свойствами фильтрующего материала и необходимым расширением слоя. В тех случаях, когда наиболее мелким материалом двухслойной загрузки служит песок, скорость обратного потока воды должна быть такой же, как для фильтров с обычной обратной промывкой при такой же крупности песка, что и песок, образующий нижний слой (см. с. 277). Поскольку в этом случае интенсивность промывки больше, чем при промывке фильтров с одним однородным слоем, то размеры



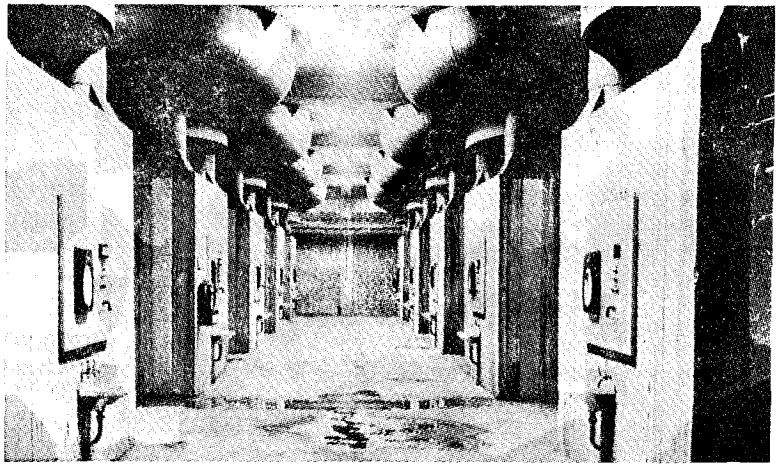


Рис. 9.21. Десять фильтров диаметром 6 м, работающие на S. A. Esperance — Longdoz, Chertal (Бельгия). Вид изнутри и снаружи здания

трубопроводов запорной арматуры, а также производительность промывных насосов должны быть соответственно увеличены. Кроме того, расширение фильтрующей загрузки означает, что каналы, используемые для отвода промывной воды из фильтра, должны быть расположены выше, чем обычно.

9.4.2.3. Ультраскорые двухслойные фильтры (UHR). Для ультраскорых двухслойных фильтров подбирают такое сочетание антрацита и песка различной крупности, которое обеспечивает требуемое качество фильтрата.

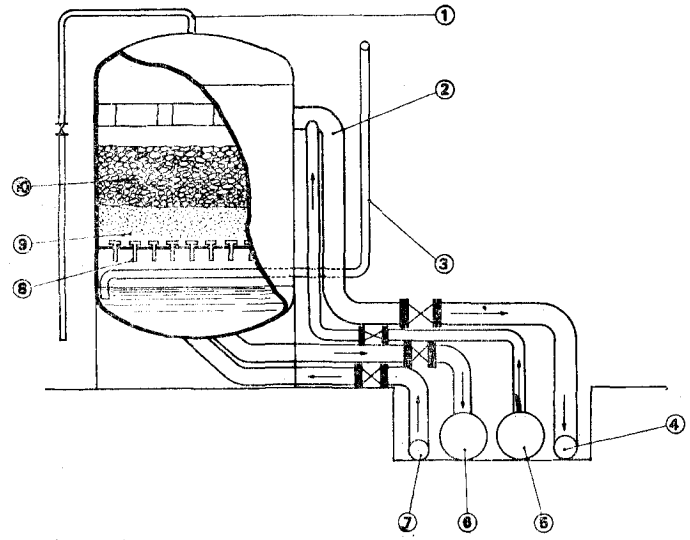


Рис. 9.22. Схема фильтра типа Медиазер

1 — выпуск воздуха; *2* — отвод промывной воды; *3* — труба впуска воздуха; *4* — сброс промывной воды; *5* — подача сырой воды; *6* — отвод фильтрованной воды; *7* — подача промывной воды; *8* — днище с колпачками; *9* — песок; *10* — антрацит

Фильтры UHR предназначены для работы при скоростях 25—50 м/ч и для задержания очень плотных зернистых материалов или большого количества взвешенных веществ.

Для этой цели необходимо обеспечить:

комбинацию антрацита и песка с оптимальными размерами зерен;

высоту слоя загрузки фильтра более 2 м;

разработку технологии удаления больших количеств задержанных веществ и продувки воздухом.

Эти фильтры выпускаются в виде вертикальных цилиндрических аппаратов из металла или бетона, открытой или напорной модификации. Они могут работать с большими интервалами между промывками. Несмотря на высокий мгновенный расход промывной воды, их целесообразно использовать при обработке сточных вод прокатных станов и сточных вод нефтеочистительных заводов. Другая область их применения — обработка поверхностного стока.

9.4.2.4. Двойные и тройные колонны. Они состоят из двух или трех фильтров, каждый из которых имеет один или два фильтрующих слоя. Фильтры смонтированы один над другим в одном цилиндрическом корпусе. Эти колонны работают так же, как отдельные фильтры, и используются в том же количестве и таких же размеров, как отдельные фильтры. По сравнению с одним фильтром того же объема колонны занимают меньшую

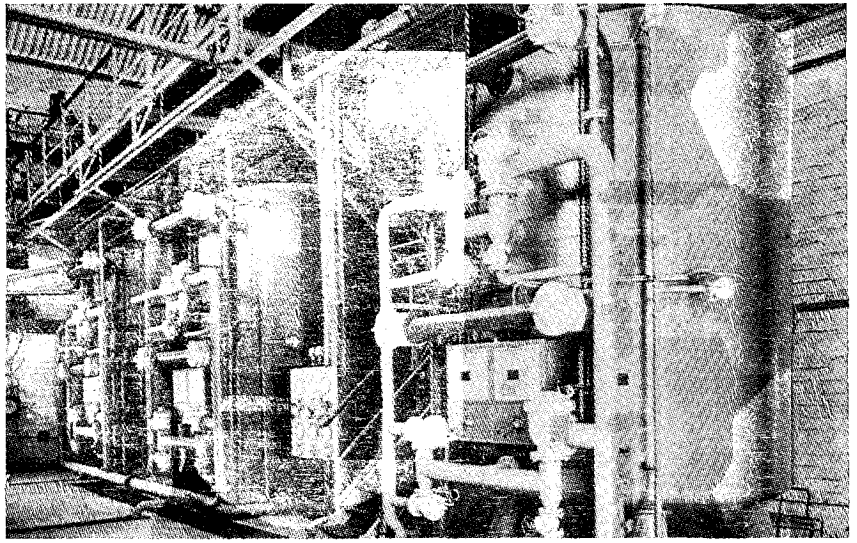


Рис. 9.23. Фильтровальные колонны диаметром 2,8 м для подготовки технологической воды (*общая производительность* 135 м³/ч)

площадь, если это позволяет высота помещения, в котором они расположены. Поскольку фильтры в колоннах разделены на несколько отдельных блоков, мгновенное количество потребляемой промывной воды также меньше. Достоинства этих фильтров особенно проявляются, когда:

на промывку должна забираться фильтрованная вода, поскольку потери ее велики;

расход фильтрованной воды должен оставаться постоянным, а скорость фильтрования на остальных фильтрах, находящихся в работе, должна быть увеличена; необходимое увеличение скорости в этом случае не очень велико.

Поскольку фильтры необходимо промывать в определенной последовательности, желательно обеспечить полностью автоматизированное управление, при этом запорная арматура может быть небольших размеров.

9.4.2.5. Двухпоточные фильтры типа 2F. Этот тип фильтров позволяет удвоить скорость фильтрования на 1 м² горизонтального сечения фильтра путем рационального использования фильтрующей загрузки, которую применяют для фильтрования в направлении как сверху вниз, так и снизу вверх, а фильтрат удаляется из середины фильтра. Этот фильтр (рис. 9.24) имеет устройство для впуска сырой воды. Оно раздельное и выполнено из двух частей: первая *1* подводит воду к верхней выпуклой части корпуса фильтра, а вторая *2* — к нижней выпуклой части. Днище оборудовано специальными колпачками с длинной хвостовой частью и широкими отверстиями для прохода воды. Глубокий слой песка характеризуется однородным размером зерен на всю глубину загрузки. Разветвленный коллектор служит для сбора фильтрованной воды. Он погружен в среднюю часть фильтрующего слоя. Чаша предназначена для сбора промывной воды, которая затем удаляется по трубе.

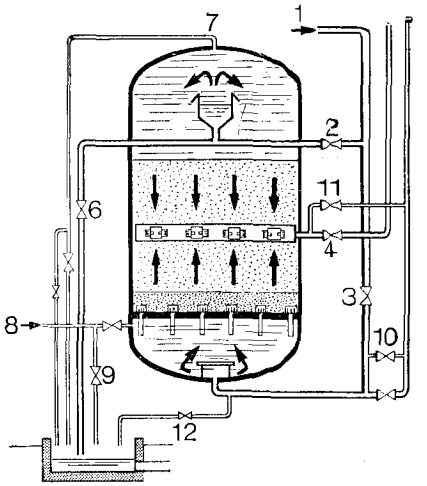


Рис. 9.24. Закрытый фильтр типа D2F для двухпоточного фильтрования

1 — впуск сырой воды; *2* — верхний впуск воды; *3* — нижний впуск воды; *4* — выпуск фильтрованной воды; *5* — впуск промывной воды; *6* — выпуск промывной воды; *7* — выпуск воздуха; *8* — подача сжатого воздуха; *9* — бай-пасс на линии сжатого воздуха; *10* — перепуск промывной воды; *11* — промывка коллектора фильтрованной воды; *12* — в канализацию

Производительность этого фильтра не больше, чем у двух аналогичных фильтров, смонтированных один над другим, которые работают с противоположно направленными потоками, но при одинаковых скоростях фильтрования и с одинаковыми потерями напора. Два противоположно направленных потока поддерживают песок в его первоначальном состоянии; таким образом, опасность взвешивания слоя песка во время работы исключена. Применение этого фильтра возможно только при соблюдении однородности загрузки по всей глубине. Если бы тонкий песок сконцентрировался в верхней части, произошло бы очень быстрое забивание поверхности и почти весь поток воды направился бы снизу вверх; в результате нижний фильтрующий элемент очень быстро вышел бы из строя.

Операция промывки должна быть эффективна и в то же время не должна вызывать расширения песчаной загрузки. Это достигается применением обратной промывки с воздухом. Интенсивность промывки выбирают в соответствии с размером зерен песка и природой задерживаемых частиц.

В особенно трудных условиях, когда задерживаемые вещества одновременно являются тяжелыми, липкими и содержатся в высоких концентрациях, для фильтров этого типа можно применять пульсационную промывку (патент фирмы «Дегремон»), которая обеспечивает гарантию, что фильтрующие слои работают в оптимальных условиях. Исключен риск заиливания отдельных зон фильтра. Для такой системы промывки используют стандартное оборудование, к которому добавляется клапан типа «бабочка» на линии подачи сжатого воздуха. Этот клапан может работать автоматически по заданной программе.

Работа фильтра характеризуется следующими параметрами. расход воздуха 60—80 м³/(м²·ч), расход промывной воды во время подачи воздуха 10—15 м³/(м²·ч), расход промывной воды при отмывке фильтра 20—30 м³/(м²·ч), если на нем задерживаются относительно легкие загрязнения, и 30—50 м³/(м²·ч) для фильтров, используемых для отделения тяжелых осадков.

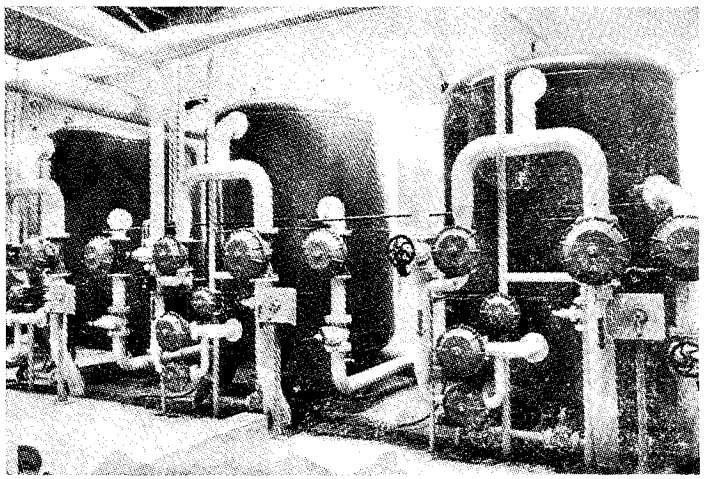


Рис. 9.25. Фильтры типа D2F диаметром 2,5 м с одноколлекторной системой труб (полуавтоматическое управление) для подготовки технологической воды (производительность 300 м³/ч)

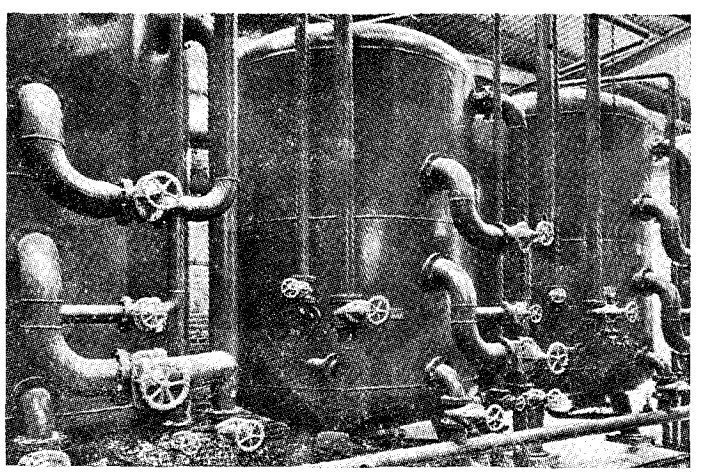


Рис. 9.26. Три фильтра типа D2F диаметром 2,8 м для подготовки технологической воды с двухколлекторной системой труб в каждом (производительность 300 м³/ч)

Фильтр марки 2F может быть оборудован автоматической системой, позволяющей работать в полуавтоматическом или полностью автоматическом режимах. Такой тип фильтра можно рекомендовать главным образом для фильтрования речной воды или относительно мутных вод и во всех случаях, когда необходимо обеспечить фильтроцикл большой длительности.

9.4.3. ГОРИЗОНТАЛЬНЫЕ ФИЛЬТРЫ С ВОДОВОЗДУШНОЙ ПРОМЫВКОЙ

Закрытые фильтры с водовоздушной промывкой могут быть конструктивно оформлены в виде горизонтального цилиндрического сосуда. Такая конструкция особенно удобна, если требуется иметь большую поверхность фильтрования. Используя горизонтальную конструкцию, можно увеличить длину аппарата без изменения его диаметра. Горизонтальные фильтры работают по такому же принципу, как и вертикальные. Их применяют для очистки вод с низким или средним содержанием взвешенных веществ, поскольку глубина песчаного слоя ограничена по конструктивным соображениям. Они также удобны для фильтрования осветленной воды и могут работать как под давлением, так и без него.

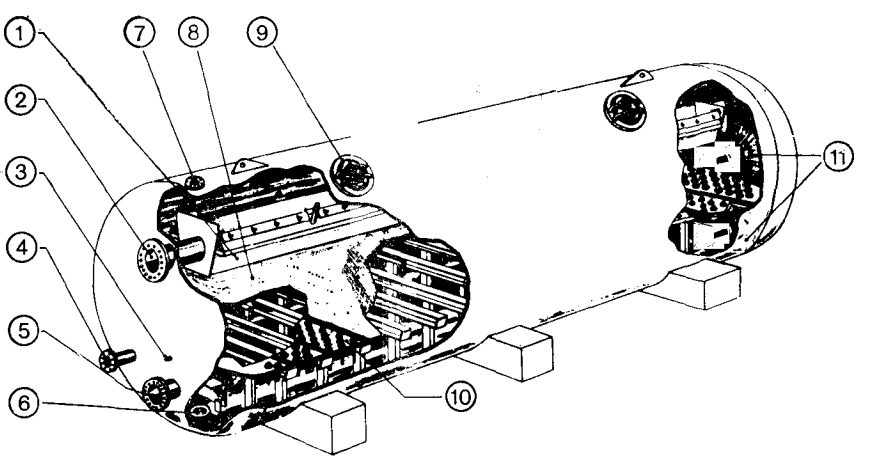


Рис. 9.27. Горизонтальный фильтр с днищем, приспособленным для обратной промывки водой и продувки воздухом

1 — канал распределения сырой воды и сбора промывной воды; *2* — впуск сырой воды — выпуск промывной воды; *3* — клапан контроля воздушной подушки и отбора проб; *4* — впуск сжатого воздуха; *5* — выпуск фильтрованной воды. Впуск промывной воды; *6* — штуцер опорожнения; *7* — выпуск воздуха; *8* — фильтрующая загрузка; *9* — люк; *10* — днище, оборудованное колпачками

9.5. ОТКРЫТЫЕ ФИЛЬТРЫ

На станциях подготовки питьевой воды и многих станциях осветления промышленных вод и сооружениях доочистки сточных вод большой производительности используют открытые, чаще всего железобетонные фильтры.

В зависимости от условий эксплуатации реагенты либо вообще не добавляются к сырой воде, либо коагуляция проводится без стадии осаждения, или, как это происходит чаще всего, воду подвергают коагуляции, флокуляции и осветлению. Метод обработки влияет на конструкцию фильтров и в особенности на компоновочное решение станции.

В отличие от медленных фильтров (см. с. 256) эти открытые фильтры работают, как правило, при скоростях фильтрования 4—20 м/ч. По технологическим параметрам можно классифицировать эти фильтры на скорые и высокоскоростные. Скорые фильтры традиционного типа работают при скоростях фильтрования около 5—10 м/ч. Фирма «Дегремон» выпускает фильтры типов «Аквазер-Т и N», «Медиазер-Т и N», и «Медиазер G». Высокоскоростные фильтры работают при скоростях фильтрования 7—20 м/ч. В эту категорию входят фильтры типа «Аквазер V», «Медиазер V» и «Медиазер GH», а также двухпоточные фильтры, различные типы которых детально описаны ниже.

9.5.1. СКОРЫЕ ФИЛЬТРЫ СО СКОРОСТЬЮ ФИЛЬТРОВАНИЯ 5—10 М/Ч

9.5.1.1. Фильтры с одним однородным слоем типа «Аквазер Т и N». Характерные особенности этих фильтров следующие:

фильтрующая загрузка из песка однородной крупности, которая остается однородной после промывки;

обратная промывка осуществляется одновременно воздухом (с высокой интенсивностью) и водой (с низкой интенсивностью) с последующей отмывкой водой при средних скоростях, что не приводит к расширению фильтрующей загрузки;

небольшая глубина воды над песком — 0,5 м;

сниженные потери напора, обычно 2 м, чтобы избежать возможности чрезмерного забивания, вызывающего значительную деаэрацию воды.

В зависимости от состава воды и ее чувствительности к деаэрации максимальная скорость фильтрования может быть 7—10 м/ч.

Фильтры типа Т и N отличаются только конструкцией днища, которое служит для поддержки фильтрующего материала.

Фильтры типа Т оборудованы колпачками с длинными стержнями типа Д20 (см. рис. 9.13), которые ввертываются в съемное днище, изготовленное из бетонных плит (рис. 9.30) или из армированного полиэстера (рис. 9.29).

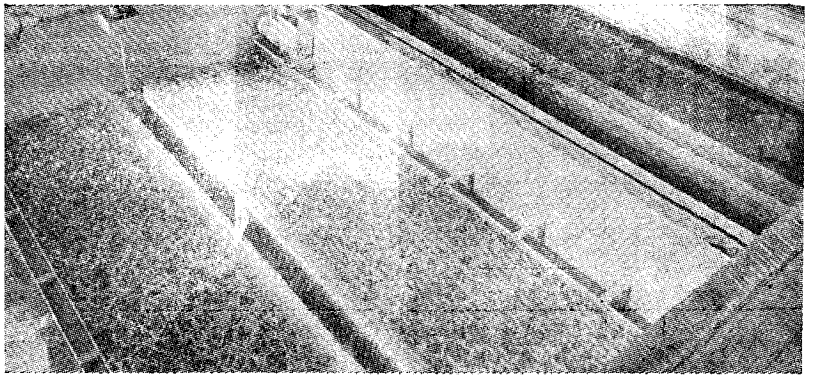


Рис. 9.28. Фильтры «Аквазер» типа *V*: водовоздушная промывка

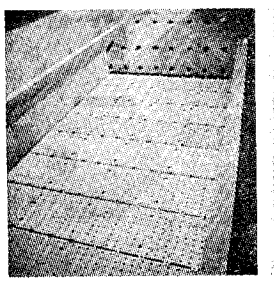


Рис. 9.29. Плита из усиленного полиэстера длиной, равной ширине ячейки фильтра (фильтр типа *V*)

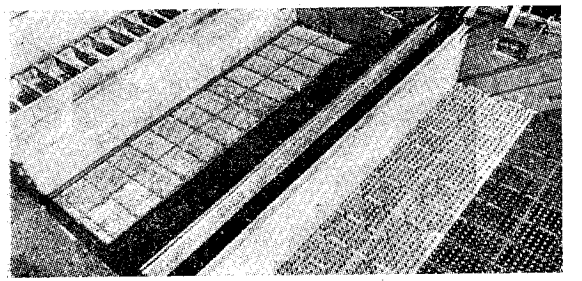


Рис. 9.30. Фильтры «Аквазер» типа *Т* в процессе монтажа (слева направо: поддерживающие элементы, днище из бетонных плит, и днище, оборудованное колпачками)

В фильтрах типа Т с небольшой поверхностью фильтрования воздух распределяется по трубе, расположенной под днищем (рис. 9.31).

В фильтрах большего размера воздух распределяется по бетонному каналу, расположенному под одним из каналов для отвода промывной воды (рис. 9.32).

В обоих случаях воздух равномерно распределяется по всей поверхности фильтра благодаря воздушной подушке, образовавшейся в результате наличия колпачков с длинными стержнями (плотность расположения которых должна быть по крайней мере 50 шт. на 1 м^2 поверхности днища).

Фильтры типа N оборудованы небольшими колпачками типа Д13 без стержней (см. рис. 9.11). Колпачки ввернуты в днище, изготовленное из асбестоцементных плит; число колпачков — 80 шт. на 1 м^2 поверхности днища. Воздух распределяется при

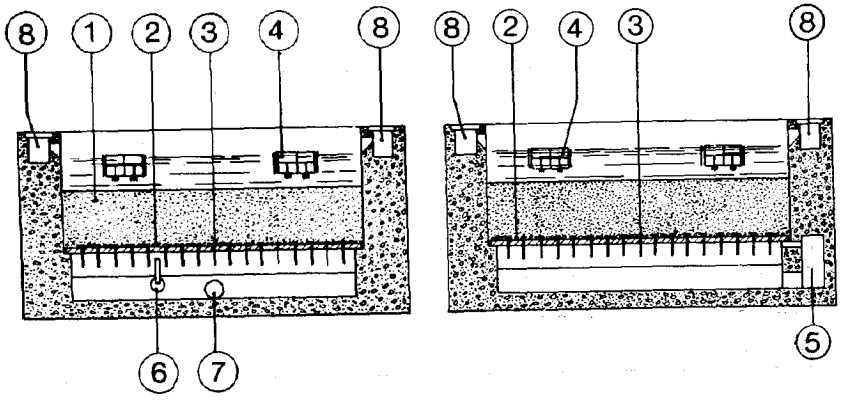


Рис. 9.31.—9.32. Схема фильтра «Аквазер» (модель *Т*) с бетонным днищем и трубой для подачи сжатого воздуха

1 — песок; *2* — бетонное днище; *3* — колпачки; *4* — откидные клапаны на впуске воды; *5* — канал для распределения водовоздушной смеси и отвода фильтрованной воды; *6* — труба для подачи сжатого воздуха; *7* — впуск промывной воды и отвод фильтрованной воды; *8* — каналы для удаления осадка

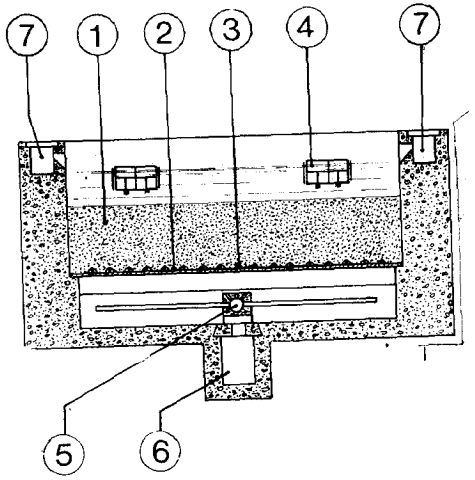


Рис. 9.33. Схема фильтра «Аквазер» типа *N* с днищем из фиброцемента:

1 — песок; *2* — фиброцементное днище; *3* — колпачки; *4* — откидные клапаны на впуске воды; *5* — коллектор для подачи сжатого воздуха; *6* — впуск промывной воды и выпуск фильтрованной воды; *7* — каналы для удаления осадка

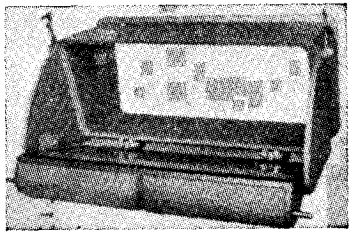


Рис. 9.34. Клапан впуска воды в открытом положении во время фильтрования

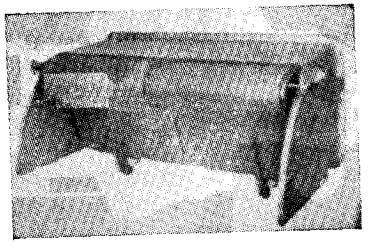


Рис. 9.35. Клапан впуска воды в закрытом положении во время процесса промывки

помощи коллектора из дырчатых труб, расположенного под днищем.

Фильтры типа Т и N имеют только три клапана: для фильтрата, промывной воды и для воздуха.

Вода на фильтрование подается через откидной клапан, который автоматически закрывается во время промывки, когда уровень воды на фильтре поднимается выше уровня воды во впускном канале (рис. 9.34 и 9.35).

Удаляется промывная вода (осадок) путем перелива в продольные желоба.

Уровень воды на этих фильтрах регулируется «парциальным» сифоном, поворотным клапаном или седельчатым клапаном.

Эти фильтры имеют следующие характеристики:

скорость фильтрования, м³/(²м·ч)	от 5 до 10
интенсивность промывки во время подачи воздуха, м³/(м²·ч)	5—7
расход воздуха, м³/(м²·ч)	50—60
расход воды при отмывке фильтра, м³/(м²·ч) . . .	20

Размеры приведены для односекционных фильтров. Двухсекционные фильтры состоят из двух ячеек таких же размеров.

Эти фильтры конструктивно могут быть оформлены как одиночные фильтры (содержащие одну систему управления для

ТАБЛИЦА 9.1

Размеры фильтров «Аквазер Т»					
с трубами для подачи воздуха			с водовоздушным каналом		
ширина, м	длина, м	площадь поверхности, м²	ширина, м	длина, м	площадь поверхности, м²
2,46	2,58	6,35	3	8,18	24,5
—	3,42	8,5	—	9,34	28
—	4,26	10,5	—	10,5	31,5
—	5,10	12,5	—	11,6	35
—	5,94	14,5	—	12,82	38,5
—	6,78	16,5			
—	7,62	19	3,5	8,02	28
—	8,46	21	—	9,01	31,5
—	9,30	23	—	10,01	35
—	10,14	25	—	11	38,5
			—	12	42
			—	13	45,5
3,07	7,62	23,5	—	13,99	49
—	8,46	26	—	14,98	52,5
—	9,3	28,5	4	11,66	46
—	10,14	31	—	12,82	51
—	10,98	33,5	—	13,98	56
			—	15,14	60,5
			—	16,30	65
			—	17,46	70

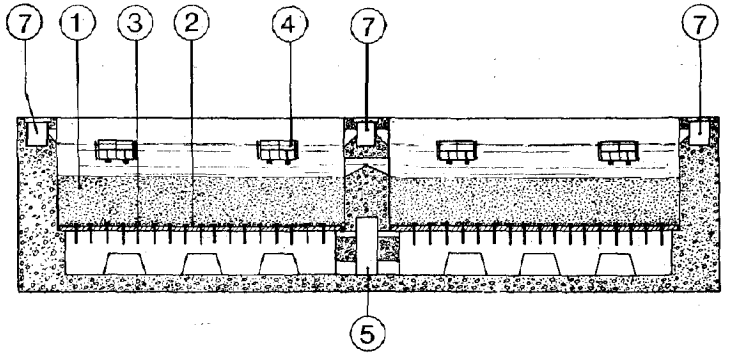


Рис. 9.36. Схема двойного фильтра «Аквазер» (модель *Т*) с бетонным днищем и водовоздушным каналом

1 — песок; *2* — бетонное днище; *3* — колпачки; *4* — откидные клапаны впуска воды; *5* — канал для распределения воздуха и промывной воды и отвода фильтрованной воды; *7* — канал для удаления осадка

каждой секции фильтра) или как сдвоенные фильтры (две секции, связанные в верхней и нижней части общей системой управления).

Фильтры «Аквазер» с малой глубиной воды промывают двумя способами: обычным и полуавтоматическим (или автоматическим).

Обычная промывка. Для промывки однослойного песчаного фильтра необходимо закрыть задвижку на выпуске фильтрованной воды, пустить воздуходувку, открыть задвижку подачи воздуха и пустить насос промывной воды. Как только воздух равномерно распределится под всей поверхностью фильтра при уровне воды ниже переливной кромки канала отвода промывной воды, слегка приоткрывают задвижку подачи промывной воды.

Через 10 мин закрывают задвижку подачи воздуха, выключают воздуходувку и полностью открывают задвижку подачи промывной воды. Когда вода, поступающая в канал промывной воды, станет чистой, закрывают задвижку подачи промывной воды. Открыв задвижку выпуска фильтрованной воды, можно пустить фильтр в работу.

Полуавтоматическая или автоматическая промывка. Операции промывки могут быть частично или полностью автоматизированы.

Мгновенное потребление энергии на промывку воздуходувкой и насосом составляет около 1,5 кВт на 1 м² поверхности фильтра; промывка длится около 15 мин, не считая времени на подготовительные операции. Расход (потребление) промывной воды зависит, в первую очередь, от качества обрабатываемой воды и составляет 1—2% объема фильтруемой воды.

Переоборудование горизонтального металлического фильтра в фильтр типа «Аквазер». Горизонтальные металлические филь-

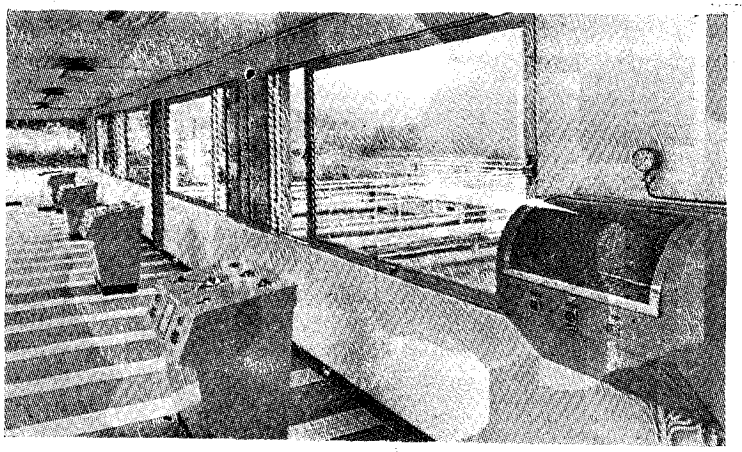


Рис. 9.37. Галерея управления для четырех фильтров «Аквазер» (площадь поверхности каждого фильтра 30 м²). Справа видна панель управления промывкой. Производительность 1250 м³/ч. Станция подготовки воды Байонне (Франция)

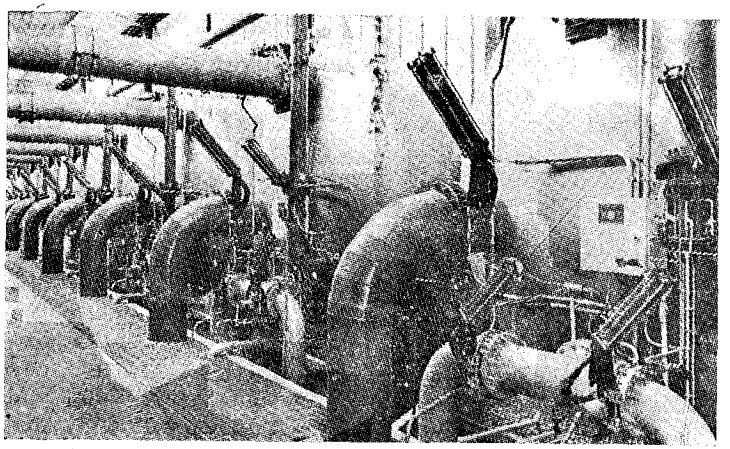


Рис. 9.38. Галерея управления горизонтальными напорными фильтрами. Производительность 1800 м³/ч

тры могут быть использованы как открытые фильтры при уровне воды во время фильтрования немного выше промывного канала. В этом случае их оборудуют такой же системой управления (сифоном, поворотным клапаном), как и для стандартных фильтров «Аквазер», и промывают воздухом и водой по той же технологии. Такое переоборудование особенно выгодно в тех случаях, когда необходимо сократить время на строительство

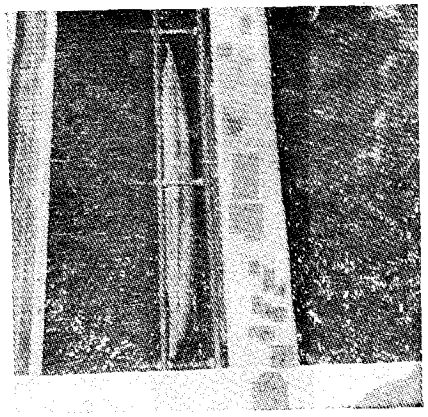


Рис. 9.39. Клапан диафрагмового типа управляющий подачей необработанной воды

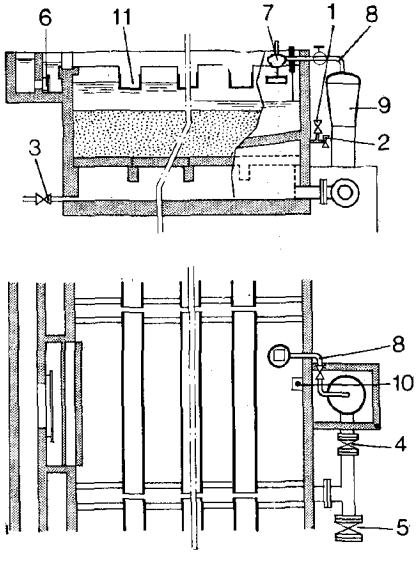


Рис. 9.40. Схема фильтра «Медиазер» с загрузкой из активного угля для второй ступени фильтрования

1 — клапан сжатого воздуха; *2* — клапан выпуска воздуха в атмосферу; *3* — задвижка на трубопроводе опорожнения; *4* — клапан фильтрата; *5* — клапан промывной воды; *6* — диафрагмовый клапан; *7* — уравнительная камера; *8* — трубопровод связи сифона и уравнительной камеры; *9* — сифон; *10* — датчик уровня; *11* — впуск необработанной воды — выпуск промывной воды

станции обработки воды, поскольку время на проведение бетонных работ сокращается.

9.5.1.2. Фильтры «Медиазер» типа T и N с однослойной или двухслойной загрузкой и с последовательной промывкой воздухом и водой. Метод промывки одновременно воздухом и водой с удалением промывной воды через верхние переливные желоба применим при условии, если это позволяет плотность фильтрующей загрузки. Хотя такая промывка возможна для песчаных загрузок, она не осуществима для активного угля или антрацита, низкая плотность которых обусловливает большие потери фильтрующего материала, если промывка осуществляется воздухом и водой. С учетом этого фильтры типа T и N либо с однослойной загрузкой из материалов низкой плотности (антрацит или активный уголь с крупным размером зерна), либо с двухслойной загрузкой из различных материалов (песок и антрацит) имеют конструкцию, позволяющую преодолеть трудности, возникающие как при подаче воды на фильтры, так и при промывке системы.

В фильтрах типа «Медиазер» над слоем фильтрующего материала находится слой воды небольшой глубины.

Для этих фильтров применяют такую же технологию промывки, как и для вертикального напорного металлического фильтра аналогичного типа, т. е. опорожнение, сопровождаемое последовательной промывкой одним воздухом и затем только водой при расширении загрузки (см. с. 279).

Сырая вода не может далее поступать через откидной клапан, поскольку последовательность операций промывки начинается со стадии опорожнения. Система впуска включает клапаны дифрагмового типа, приводимые в действие сжатым воздухом, и водослив с широким порогом в точке впуска для предотвращения размывания фильтрующей загрузки.

Работа этих фильтров требует тщательного контроля. В частности, необходимо отрегулировать и поддерживать условия промывки таким образом, чтобы избежать излишних потерь фильтрующего материала.

9.5.1.3. Фильтры типа «Медиазер G» с каналами небольших размеров, однослойной фильтрующей загрузкой, с последовательной промывкой воздухом и водой. Если фильтрующие материалы легкие и имеют малые размеры зерна, промывную воду необходимо отводить через водослив, расположенный вдоль длинной стенки фильтра. Это делается с целью предотвратить унос фильтрующей загрузки в дренаж, что особенно применимо для активного угля с эффективным размером зерна 0,55 мм, который обычно используется для фильтрования на второй ступени и не остается однородным после промывки.

Фильтр типа «Медиазер G» — вариант модели «Медиазер T и N», который приспособлен для материалов такого типа. Так же как и эти модели, он оборудован впуском сырой воды через диафрагмовый клапан и водосливом с широким порогом. Последовательная промывка включает предварительный сброс воды из фильтра, продувку воздухом и затем промывку одной водой с расширением фильтрующего материала.

Он отличается от других фильтров тем, что оборудован несколькими поперечными каналами для удаления промывной воды.

Фильтр типа «Медиазер G» может иметь многослойную загрузку из различных материалов.

9.5.2. ВЫСОКОСКОРОСТНЫЕ ФИЛЬТРЫ СО СКОРОСТЬЮ ФИЛЬТРОВАНИЯ ОТ 7 ДО 20 М/Ч

Чем выше скорость фильтрования, тем сложнее применяемая технология, особенно это касается выбора фильтрующего материала, глубины слоя, технологии промывки и гидравлических характеристик системы.

9.5.2.1. Фильтры типа «Аквазер V» с одним слоем, который остается однородным после промывки. Слой однородного материала (обычно песка) в фильтрах типа «Аквазер» полностью удовлетворяет требованиям, предъявляемым к фильтрованию при высоких скоростях.

Водовоздушная промывка, сопровождаемая поверхностной очисткой и (окончательной) отмывкой водой с той же скоростью (без расширения фильтрующей загрузки и с поверхностной

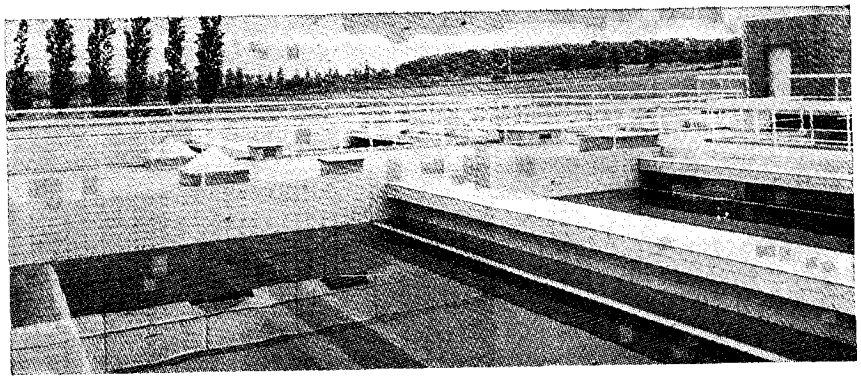


Рис. 9.41. Станция очистки воды Морсанг (Франция). Водоснабжение южного района Парижа. Фильтры «Аквазер» типа *V*. Скорость фильтрования 12,3 м/ч; производительность 3158 м³/ч

очисткой), дает возможность поддерживать фильтрующую загрузку в ее первоначальном состоянии без размывания.

При одинаковых условиях предварительной обработки сырой воды качество фильтрата, получаемого на фильтре с одним глубоким слоем загрузки, практически не отличается от качества воды, получаемой на двухслойных фильтрах.

Фильтры типа «Аквазер V» оборудованы днищем такой же конструкции и с такими же механизмами управления (сифон или поворотный клапан), как и у фильтров типа «Аквазер Т». Они отличаются лишь тем, что:

глубина воды над поверхностью загрузки значительно больше; она никогда не бывает менее 1 м и обычно составляет 1,2 м;

слой фильтрующей загрузки глубокий однородный (в случае доочистки сточных вод используется песок или байолит);

имеют иные системы подачи воды и промывки. Последняя использует поверхностный смыв сырой водой.

Если в качестве фильтрующего материала используют песок, оптимальный размер зерна должен быть 0,95—1,35 мм (предельные значения 0,7—2 мм), скорость фильтрования 7—20 м³/(м²·ч), интенсивность обратной промывки фильтрованной водой 13—15 м³/(м²·ч), интенсивность подачи воздуха 50—60 м³/(м²·ч).

Стандартные размеры ячейки фильтров типа V с бетонным днищем приведены в табл. 9.2.

Двухсекционные фильтры состоят из двух идентичных ячеек, рассмотренных выше.

Фильтры с днищем из плит из армированного полиэстера имеют те же размеры, что и фильтры с бетонным днищем, но ширина у них меньше (3; 3,5; 4 и 5 м).

ТАБЛИЦА 9.2

Ширина, м	Длина, м	Площадь поверхности, м²	Ширина, м	Длина, м	Площадь поверхности, м²
3	8,18	24,5	4	15,14	60,5
—	9,34	28	—	16,30	65
—	10,5	31,5	—	17,46	70
—	11,6	35			
—	12,82	38,5	4,66	12	56
			—	13	60,5
3,5	8,02	28	—	13,99	65
—	9,01	31,5	—	14,96	69,5
—	10,01	36	—	15,98	74,5
—	11	38,5	—	16,97	79
—	12	42			
—	13	45,5			
—	13,99	49	5	13,98	70
—	14,96	52,5	—	15,14	77
			—	16,30	81,5
4	11,6	46	—	17,46	87
—	12,82	51	—	18,62	93
—	13,98	56	—	19,78	99
			—	20,94	105

Подача воды на фильтры может быть запроектирована различными способами в соответствии с требуемой системой регулирования, т. е. основанной на измерении расхода воды или ее уровня.

На рис. 9.42 и 9.43 показан двухсекционный фильтр типа V с системой регулирования на входе. Фильтруемая вода, выходя из обычного канала сырой воды *1*, равномерно распределяется между различными фильтрами благодаря сочетанию диафрагмы *2* и водослива *3*. Она поступает на фильтр через отверстия *4* и проходит сквозь фильтрующую загрузку *5*, глубина которой принята в зависимости от скорости фильтрования. Фильтрованная вода собирается в канале *6* с регулятором *7* и затем сбрасывается в обычный канал *8*. Устройство *9* показывает потери напора на фильтре и может передавать соответствующий сигнал.

Как только достигается максимальная степень забивания фильтра при хорошем качестве фильтрата, фильтр выводят на промывку (рис. 9.44).

На первой стадии промывки уровень воды сбрасывают до отметки верхней кромки промывного канала *10*. Для этого обычно прекращают фильтрование и открывают задвижку сброса промывной воды *11*. Это можно сделать и не прекращая фильтрования, но прекратив подачу воды на фильтр при помощи диафрагмовых отсечных клапанов (см. рис. 9.39), встроенных в систему подачи сырой воды.

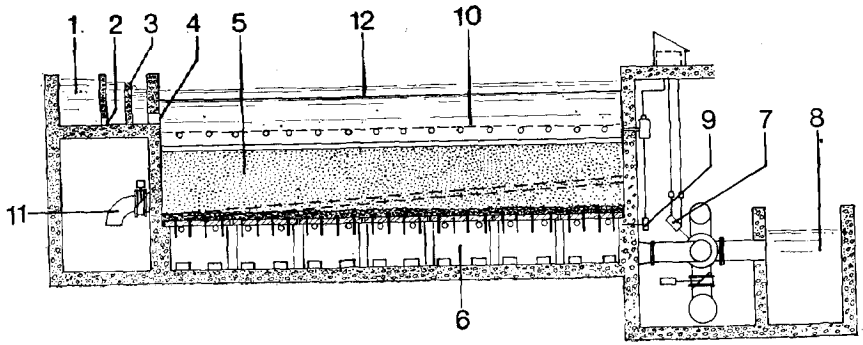


Рис. 9.42. Схема фильтра «Аквазер» модели *V*

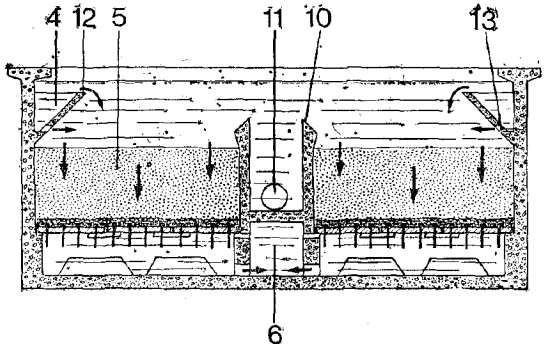


Рис. 9.43. Процесс фильтрования на фильтре «Аквазер» модели *V*

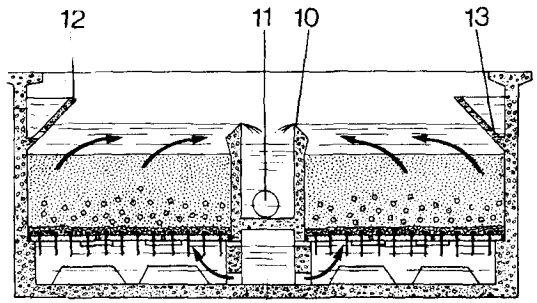


Рис. 9.44. Водовоздушная промывка с поверхностным смывом на фильтре «Аквазер» модели *V* (поз. см. на рис. 9.43)

Вторая стадия промывки (продолжительность 4—5 мин) состоит в сочетании обычной промывки фильтров «Аквазер» с поверхностным смывом сырой водой, которая продолжает поступать через отверстия *4*, достигает V-образных каналов *12* и направляется в верхнюю часть фильтра через отверстия *13*. В это же самое время осуществляется подача воздуха одновременно с обратной промывкой фильтрованной водой при интенсивности 13—15 м³/(м²·ч), что обеспечивается специальной формой водосливов для промывной воды.

Стадия окончательной промывки заключается в обратной промывке с тем же расходом фильтрованной воды, что и ранее, и поверхностном смыве. Эта операция продолжается 3—4 мин.

С учетом времени, необходимого для приведения в действие задвижек продолжительность промывки в целом составляет

10—12 мин; она заканчивается наполнением фильтра водой до его нормального рабочего уровня.

Промывка батареи фильтров типа V, таким образом, не требует увеличения производительности воздуходувки и насоса промывной воды. Учитывая, что промывка осуществляется без расширения загрузки, нет необходимости в согласовании скорости промывки с периодическими изменениями температуры воды.

Преимущество фильтров этого типа состоит в том, что в них предусмотрены все конструктивные особенности, обеспечивающие высококачественную фильтрацию и эффективную промывку:

в течение всего процесса промывки на фильтр продолжает поступать сырая вода, полностью или частично необходимая для поверхностного смыва. В течение этого периода другие фильтры в этой секции не испытывают существенного увеличения расхода воды или скорости фильтрования;

они специально предназначены для работы с высокими скоростями фильтрования с использованием песчаных загрузок с толщиной слоя 1—2 м;

во время фильтроцикла по всей глубине песчаной загрузки поддерживается положительное давление;

промывка осуществляется без расширения загрузки, что позволяет избежать какой-либо гидравлической классификации фильтрующей загрузки (см. с. 268);

требуется небольшой расход фильтрованной воды на обратную промывку, что значительно снижает как расход энергии, так и количество необходимого оборудования;

обратная промывка водой, которая продолжается во время продувки воздухом, дополняется поверхностной промывкой. Отвод воды на этих фильтрах осуществляется так же, как и на фильтрах «Аквазер» моделей T и N;

фильтрование возобновляется путем подъема уровня воды, независимо от применяемой системы регулирования; там, где это требуется, такой постепенный пуск может быть продлен до 15 мин;

метод промывки при помощи насоса при постоянной скорости подачи воды позволяет отказаться от применения резервуара промывной воды, расположенного на высоких отметках.

9.5.2.2. Однослойные и многослойные фильтры «Медиазер» типа V с последовательной промывкой воздухом и водой. Как уже говорилось в отношении фильтров «Медиазер» типа T и N, фильтры типа V могут быть приспособлены для однослойных фильтрующих загрузок (глубокий слой, состоящий из легких материалов, например, антрацит или активный уголь грубой формы), а также двухслойных загрузок из различных материалов (антрацит и песок).

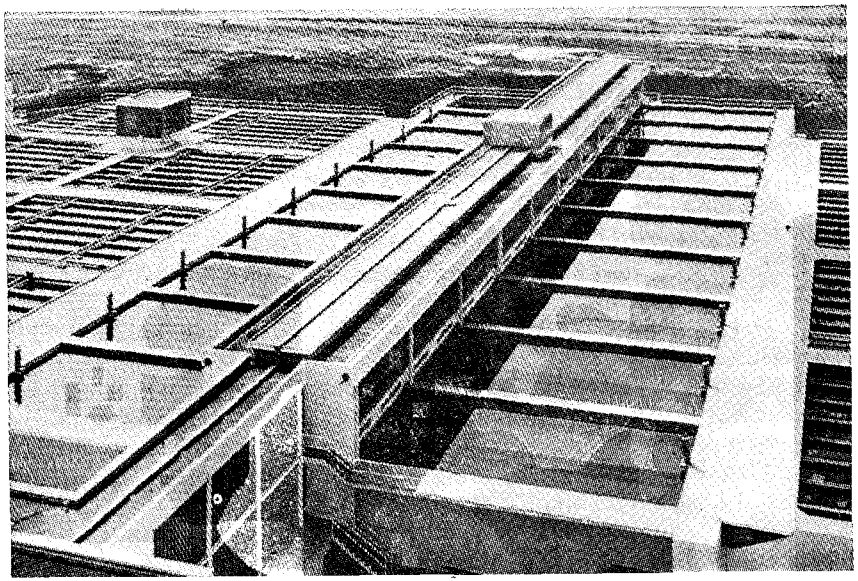


Рис. 9.45. Фильтры «Аквазер» модели *V* с центральной галереей управления. Станция приготовления питьевой воды для Парижа в г. Орли

Конструкция фильтров «Аквазер V», работающих с глубоким слоем воды, остается неизменной, за исключением системы подачи воды на фильтр и системы промывки, так как невозможно промывать загрузку из легких материалов одновременно с продувкой воздухом и обратной промывкой, без риска потерь больших количеств фильтрующего материала.

Процесс промывки включает три стадии:

сброс сырой воды, который должен продолжаться до тех пор, пока ее уровень станет немного выше верха фильтрующей загрузки. Это понижение уровня может быть достигнуто либо фильтрованием, либо сбросом воды в дренаж;

продувку воздухом с целью отделить загрязнения от зерен фильтрующей загрузки. Во время этой продувки поверхностный смыв сырой водой не производится;

высокоскоростную промывку одной водой с целью расширения фильтрующей загрузки и удаления загрязнений, которые распространились по всей глубине загрузки во время продувки воздухом; в случае двухслойной фильтрующей загрузки осуществление более или менее полного гидравлического разделения двух различных слоев.

Во время этой финальной стадии сырую воду еще раз впускают через боковые каналы, чтобы очистить поверхность и тем самым удалить загрязнения. Для этого необходимы:

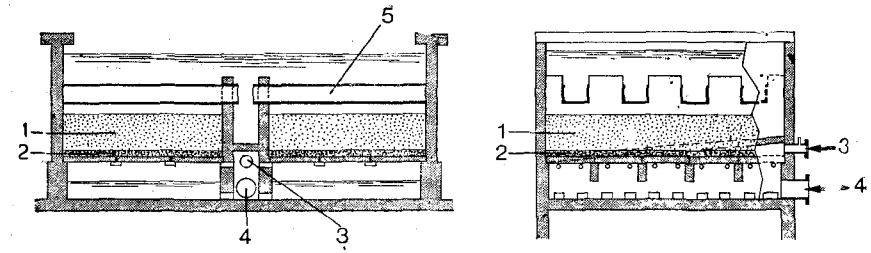


Рис. 9.46. Схема фильтра «Медиазер» модели *LH*

1 — фильтрующая загрузка; *2* — поддерживающий слой; *3* — подача сжатого воздуха; *4* — впуск промывной воды. Отвод фильтрованной воды; *5* — впуск сырой воды. Выпуск промывной воды

наличие одного или нескольких затворов или диафрагмовых отсечных клапанов (см. рис. 9.39) для того, чтобы полностью отключать подачу сырой воды на фильтр во время его дренирования и продувки воздухом, и частично изолировать его во время последней стадии промывки одной водой, тем самым создавая эффект поверхностной промывки с низкой интенсивностью;

наличие электродов (расположенных выше верха фильтрующей загрузки), чтобы остановить сброс воды перед промывкой;

интенсивность подачи воздуха 50—60 $м^3/(м^2 \cdot ч)$ через колпачки, при плотности их размещения 50 шт. на 1 $м^2$ поверхности;

высокая скорость обратной промывки, соответствующая характеристикам фильтрующей загрузки и рассчитанная на поддержание постоянной степени расширения загрузки во время всего периода промывки.

Из этого следует, что при одинаковой скорости фильтрования и одинаковой длительности фильтроцикла фильтры этого типа требуют значительно больше добавочного оборудования, чем сооружение с глубоким однородным песчаным слоем.

9.5.2.3. Фильтры «Медиазер GH» с каналами малых размеров, однослойной загрузкой, промывкой последовательно воздухом и водой. Рассмотренные фильтры большой глубины не могут быть использованы без модификации, если применяется фильтрующая загрузка из легкого и мелкозернистого материалов (например, активный уголь) с малым эффективным размером зерна при доочистке сточных вод. Чтобы избежать потери зернистого материала с промывной водой, необходимо обеспечить малые скорости подхода воды к водосливам водосборных лотков во время промывки. В этих условиях следует использовать фильтры, в которых промывная вода собирается многочисленными поперечными лотками (рис. 9.46) при небольших удельных расходах воды на единицу длины сборных водосливов.

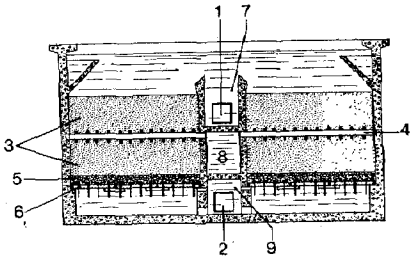


Рис. 9.47. Схема двухпоточного фильтра «Аквазер» модели *V*

1 — верхний подвод сырой воды; *2* — донный подвод сырой воды; *3* — фильтрующая загрузка; *4* — коллектор, оборудованный колпачками для удаления фильтрованной воды; *5* — слой гравия; *6* — днище, оборудованное колпачками с длинными стержнями; *7* — канал для отвода осадка; *8* — канал для отвода фильтрата; *9* — канал водовоздушной промывки

Фильтры модели *GH*, имеющие те же размеры секций, что и фильтры «Аквазер типа V», могут быть оборудованы аналогичными днищем и системой управления. Способ подачи воды выбирается в соответствии с типом системы регулирования, система промывки идентична применяемой для фильтров «Медиазер типа V», т. е. она включает продувку одним воздухом и последующую обратную промывку с расширением фильтрующей загрузки. Единственное различие состоит в отсутствии поверхностного смыва.

9.5.2.4. Двухпоточные открытые фильтры типа D2F. Принцип работы их аналогичен принципу работы двухпоточных напорных фильтров, описанных ранее. Этим фильтрам может предшествовать стадия флокуляции и осветления.

Система управления поддерживает заданный расход фильтрованной воды в зависимости от ее уровня на фильтре. Конструкцией предусмотрено устройство для распределения воды равномерно между всеми фильтрами.

Открытые фильтры типа D2F позволяют получить фильтрат высокого качества, они работают при высоких скоростях фильтрования, сохраняя в то же время преимущества фильтров с одновременной водовоздушной промывкой.

Фильтры этой конструкции могут быть запроектированы как по типу фильтров Т для фильтрования со скоростями до 12 м/ч, или как тип V для фильтрования при более глубоком слое воды (рис. 9.47) и бóльших скоростях фильтрования.

9.5.3. БЕЗЗАДВИЖЕЧНЫЕ САМОПРОМЫВАЮЩИЕСЯ ФИЛЬТРЫ С АВТОМАТИЧЕСКИМ СИФОНОМ

Как в процессе фильтрования, так и при промывке эти фильтры работают автоматически без использования электроэнергии или каких-либо вспомогательных гидравлических систем. Фирма «Дегремон» поставляет эти фильтры более 50 лет, в течение которых конструкция непрерывно совершенствовалась.

Фильтруемую воду забирают из буферного резервуара. После фильтрования через мелкозернистую загрузку она поднимается из нижней части фильтра в накопительный резервуар фильтрованной воды, расположенный выше. Как только резервуар наполнится, вода через перелив начинает поступать к потребителю.

По мере забивания фильтрующей загрузки уровень в буферном резервуаре и в верхней части сифона, нижний конец которого погружен в воду, поднимается. Как только потери напора достигнут максимального расчетного уровня, сжатый воздух резко выбрасывается из сифона: сифон немедленно заряжается и вода поступает из накопительного резервуара обратным потоком через фильтр; объем резервуара подобран таким образом, чтобы обеспечить надежную промывку фильтрующей загрузки.

В фильтрах этого типа загрузка никогда не подвергается излишнему загрязнению, поскольку промывка осуществляется автоматически при заданных и фиксированных потерях напора. Никаких механических частей в системе нет.

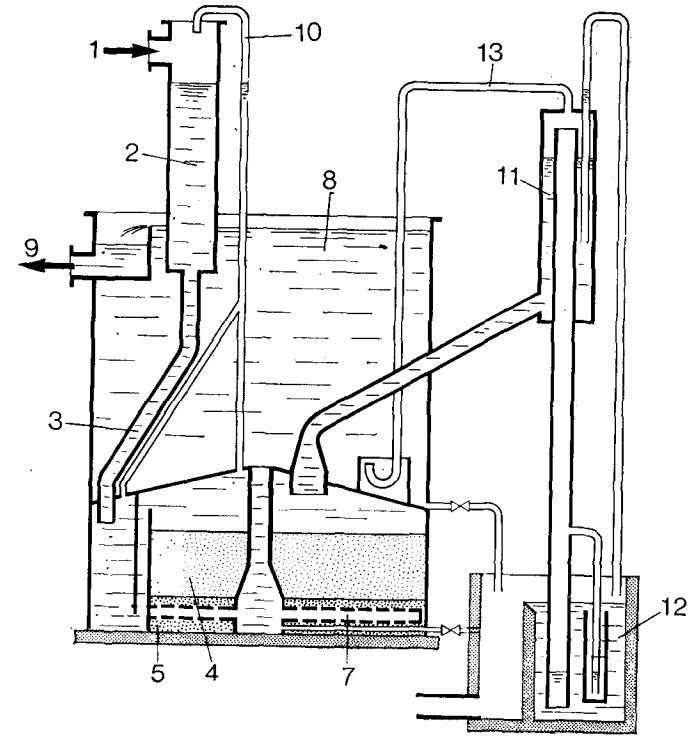


Рис. 9.48. Схема беззадвижечного самопромывающегося фильтра

1 — подвод сырой воды; *2* — верхний резервуар; *3* — труба для сырой воды; *4* — фильтрующий слой; *5* — поддерживающий слой; *7* — труба для фильтрата; *8* — сборный резервуар фильтрованной воды; *9* — выход фильтрата; *10* — вентиляционная трубка; *11* — сифон для промывной воды; *12* — резервуар для возврата промывной воды; *13* — трубка разряда сифона

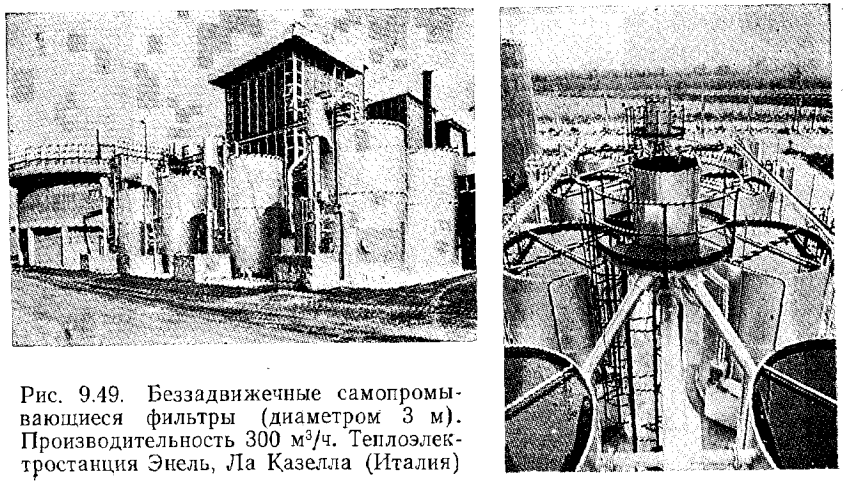


Рис. 9.49. Беззадвижечные самопромывающиеся фильтры (диаметром 3 м). Производительность 300 м³/ч. Теплоэлектростанция Энель, Ла Казелла (Италия)

Этот фильтр может быть использован, например, в тех случаях, когда на месте его установки отсутствует сжатый воздух или электроэнергия. Эти фильтры удобны для фильтрования воды с низким и средним содержанием взвешенных веществ, когда система водоснабжения объекта допускает возможность перерывов в ее подаче, возникающие в период наполнения накопительного резервуара.

Максимальная скорость фильтрования обычно 10 м³/(м²·ч).

9.5.4. СУХИЕ ФИЛЬТРЫ

Загрузка сухих фильтров не погружена в воду. В них вода разбрызгивается над поверхностью песка, как в биофильтрах. Их используют в некоторых странах, особенно в Голландии, для обработки чистой подземной воды, содержащей как марганец, так и аммоний.

Циркуляция воздуха через загрузку ускоряется путем отсоса воздуха из-под днища с помощью воздуходувки или эжектора.

Нитрифицирующие бактерии развиваются на песке и превращают аммонийный азот в азот нитритов. Марганец хорошо осаждается в форме MnO_2 на поверхности песка, но присутствие аммония, по-видимому, необходимо, потому что он поддерживает рост окисляющих бактерий.

Если встречаются какие-либо трудности с удалением марганца, перед фильтрованием добавляют небольшое количество перманганата калия.

Сухие фильтры постепенно забиваются. Когда на поверхности песка образуется слой воды, свидетельствующий о том, что воздух не может больше проникать в слой песка и окисление марганца или аммония становится невозможным, фильтр необходимо промыть.

Чтобы получить хорошие результаты, содержание железа должно быть достаточно низким и вода не должна содержать органических веществ.

9.6. УПРАВЛЕНИЕ ФИЛЬТРАМИ

В зависимости от системы регулирования применяют фильтры трех основных типов: с переменным уровнем и постоянным расходом, с постоянным расходом (производительность соответствует общему обрабатываемому расходу) и с переменным расходом, работающие без равномерного распределения или индивидуального управления.

9.6.1. ФИЛЬТРЫ С ПЕРЕМЕННЫМ УРОВНЕМ И ПОСТОЯННЫМ РАСХОДОМ ВОДЫ

Равномерное распределение общего расхода фильтруемой воды обеспечивается перед фильтрами, где вода падает с различной высоты в зависимости от степени их забивания. Если фильтр чистый, то поверхность песка лишь слегка покрыта водой; уровень воды поддерживается сифоном на выпуске. При максимальном загрязнении уровень достигает отметки подачи воды. Обычно уровень воды находится на высоте 1,5—2 м в

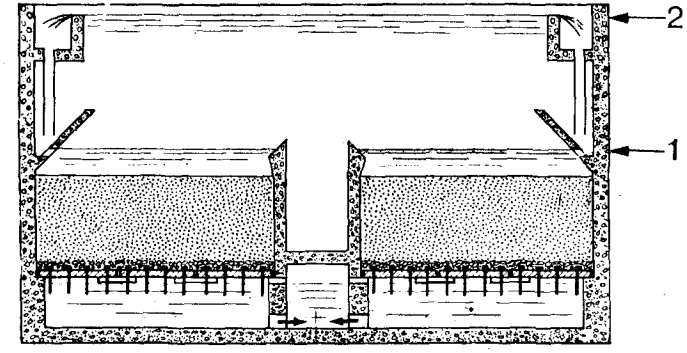


Рис. 9.50. Схема фильтра типа *V* с переменным уровнем и постоянным расходом

1 — низкий уровень, незагрязненный фильтр; *2* — высокий уровень, загрязненный фильтр

зависимости от размера зерен фильтрующей загрузки. Он не очень велик (0,8—1 м), если вместо фильтрующей среды фильтр загружен массой нейтрализующего материала, основным назначением которого не является фильтрование. По этому принципу работают фильтры «Нютралайт», для которых обычно применяется система управления с переменным уровнем.

9.6.2. ФИЛЬТРЫ ПОСТОЯННОГО РАСХОДА С КОМПЕНСАЦИЕЙ ЗАБИВАНИЯ ЗАГРУЗКИ

Уровень воды на этих фильтрах либо постоянен, либо подвержен незначительным изменениям. Фильтрованную воду выводят из фильтра на отметке на 2—3 м ниже уровня воды на фильтре. Расход ее постоянен и равен общему расходу обрабатываемой воды, деленному на число фильтров.

Назависимо от степени загрязнения фильтра постоянный расход поддерживается механизмом управления, расположенным на выходе каждого фильтра, который срабатывает от изменения либо уровня воды, либо ее расхода. Когда фильтр чист, этот регулятор создает дополнительные потери напора, которые снижаются по мере загрязнения фильтра. Таким образом, работа системы управления компенсирует потери напора, обусловленные забиванием фильтрующей загрузки.

9.6.2.1. Гидравлический регулятор. Концентрический сифон «Дегремон» и его уравнительная камера (рис. 9.51) используются для регулирования уровня. Поплавковый воздушный клапан выполняет функции чувствительного и контрольного элементов, а сифон — функции регулирования.

● Сифон состоит из двух концентрических труб. Вода проходит из внутренней камеры в наружную. Он работает таким же образом, как и обычный сифон, но значительно стабильнее.

Воздух, введенный в верхнюю часть сифона, вовлекается потоком воды в камеру с нисходящим движением воды, где плотность водовоздушной смеси будет снижаться, тем самым уменьшая вакуум в верхней части сифона. Без введения воздуха вакуум в верхней чести сифона практически равен (без учета потерь напора в камере с нисходящим движением воды) перепаду H, между уровнями воды на фильтре и в нижней камере отвода воды. С помощью воздуха этот вакуум можно снизить до величины h_1, равной произведению H и плотности водовоздушной смеси.

Разность $H - h_1 = h_2$ выражает потери напора, вызванные введением воздуха (рис. 9.53), где h_1 — потери напора при незагрязненном фильтре, обусловленные потоком фильтруемой воды, проходящей через фильтрующую загрузку, днище и трубопроводы отвода фильтрованной воды до верхней части сифона; h_2 — потери напора при загрязненном фильтре.

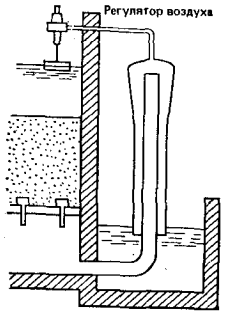


Рис. 9.51

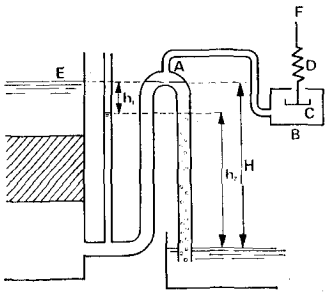


Рис. 9.52

Следовательно, для чистого фильтра в сифон необходимо внести количество воздуха, достаточное для того, чтобы создать потери напора h_2 и по мере постепенного забивания фильтрующей загрузки снижать расход воздуха, пока он не станет равным нулю, приводя к уравниванию значений h_1 и H.

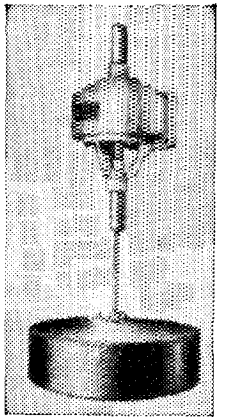


Рис. 9.53. Уравнительная камера

● Уравнительная камера (поплавковый воздушный клапан) (рис. 9.52) представляет собой устройство, которое вводит воздух в верхнюю часть сифона для управления его расходом. Она состоит из клапана C, подвешенного на пружине D, закрепленной в точке F.

Вначале, когда расход постоянен, точка F зафиксирована. Но постепенно фильтр забивается, расход падает, вызывая снижение плотности водовоздушной смеси и, следовательно, вакуума h_1 в верхней части сифона и внутри уравнительной камеры. Расход воздуха, впускаемого клапаном, и проходное сечение клапана при этом уменьшаются под действием пружины. Плотность водовоздушной смеси возрастает, увеличивается значение h_1 по мере забивания фильтрующей загрузки. Когда фильтр загрязняется полностью, впуск воздуха прекращается и отвод воды осуществляется при максимальном перепаде уровней. Если фильтр вовремя не промыт, расход воды через него начнет уменьшаться.

Таким образом, уравнительная камера автоматически компенсирует потери напора. Если предусмотрена связь уровня точки F с уровнем поплавка камеры, она также способна приводить расход воды на фильтре в соответствие с общим расходом фильтруемой воды. Увеличение расхода соответствует увеличению высоты расположения точки F и снижению количества воздуха, подаваемого в сифон. Потери напора h_2 падают, вызывая увеличение расхода воды, сбрасываемой через сифон.

● Вакуумный прибор измерения потерь напора, помещенный в верхнюю часть сифона, измеряет вакуум h_1, представляющий собой потери напора на фильтре и в трубопроводах.

● Заполнение сифона. Чтобы избежать резкого увеличения расхода, при пуске фильтра в работу (до того, как уровень воды, на котором расположен поплавок уравнительной камеры, достигнет нормального значения) достаточно предусмотреть постепенное перемещение точки F или вспомогательный впуск воздуха, который затем постепенно прекрывают. На фильтрах «Аквазер» с низким уровнем воды и регулированием на входе этот впуск вспомогательного воздуха управляется клапаном с часовым механизмом, вмонтированным в уравнительную камеру.

При регулировании на выходе поплавок уравнительной камеры постепенно достигает своего равновесного уровня при сбросе воды из фильтра.

9.6.2.2. Электронный регулятор. Надежная работа регуляторов со сжатым воздухом обеспечивается при условии, если подается очень чистый воздух, что весьма трудно осуществить на станциях водоподготовки. Для решения проблем, связанных с регулированием фильтров, фирма «Дегремон» разработала электронный прибор, который гидравлически или пневматически воздействует на исполнительный механизм (рис. 9.54).

Датчик давления 6, оборудованный деформируемым чувствительным элементом, выдает электрический сигнал, пропорционально глубине его погружения. Этот сигнал сравнивается с сигналом датчика, соответствующим уровню, который необходимо поддерживать постоянным. После определения направления дебаланса любое отклонение от заданного значения, превышающее пороговую величину, воздействует на систему триггеров электронного управляющего прибора 5. Этот прибор открывает один из двух соленоидных клапанов *4*, подачи рабочей жидкости в цилиндр *3*, управляющий поворотным клапаном *2* фильтрованной воды, который частично приоткрывается или закрывается, пока не установится состояние равновесия.

Потенциометр *8*, связанный с осью поворотного клапана, передает соответствующий сигнал в контур обратной связи. Через некоторое время сигнал погашает сам себя, таким образом возвращая уровень воды без толчков на заданную отметку.

Прибор выполнен исключительно на транзисторах. Он состоит из множества вспомогательных устройств, которые дают возможность изменять диапазон регулирования, чувствительность, коэффициент усиления и осуществлять постепенный пуск фильтра в работу после промывки в течение желаемого времени.

В качестве рабочей жидкости в цилиндре, управляющем работой поворотного клапана, могут быть использованы вода или сжатый воздух после обычного фильтрования.

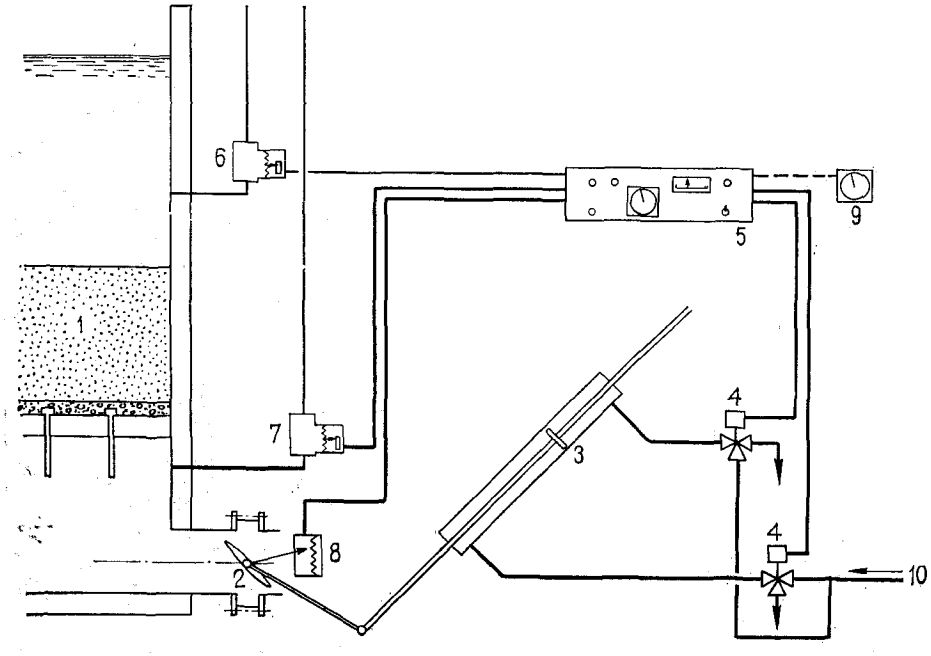


Рис. 9.54. Схема электронного механизма управления фильтром

1 — фильтрующая загрузка; *2* — клапан на выпуске фильтрованной воды; *3* — механизм управления клапаном *2*; *4* — соленоидные клапаны для подачи рабочей жидкости в цилиндр; *5* — электронный блок управления Дегремон; *6* — датчик давления для измерения уровня воды на фильтрах; *7* — датчик давления под днищем фильтра; *8* — потенциометр, установленный на оси клапана; *9* — индикатор забивания фильтра (выносной); *10* — подача рабочей жидкости в цилиндр

9.6.2.3. Управление батареей фильтров. Обычно применяют два типа регулирования: с измерением расхода и при постоянном уровне фильтруемой воды.

Регулирование с измерением расхода воды. Каждый фильтр оборудован регулятором количества фильтрованной воды на выходе, настроенным на пропускание постоянного и одинакового для всех фильтров расхода воды. Расход фильтрованной воды измеряют по перепаду давлений (сопла Вентури, диафрагмы и т. д.). Регулятор сравнивает полученный сигнал с установленным значением. В зависимости от полученной разницы регулятор открывает или закрывает рабочий орган, управляющий расходом очищенной воды (поворотный клапан, диафрагмовый клапан, сифон), пока измеряемое и установленное значения не совпадут.

Этот метод используют для регулирования работы как напорных фильтров, так и открытых. В последнем случае (описанном далее более подробно) уровень воды на фильтрах не регулируется. Чтобы привести этот уровень в соответствие с

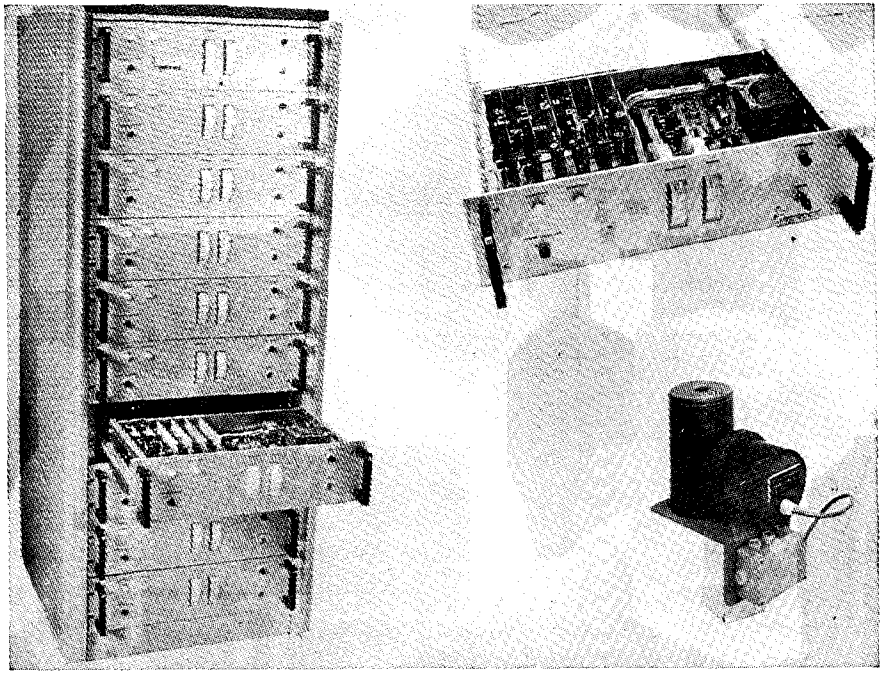


Рис. 9.55. Электронный блок

Рис. 9.56. Датчик

Рис. 9.57. Система электронных блоков Дегремон для управления батареей фильтров

общей системой управления станцией, необходимо дополнительно использовать еще один регулятор.

При регулировании общего расхода воды на входе регулятор определяет поступающий расход и поддерживает на фильтрах уровень воды 10—30 см в соответствии с индивидуально установленным расходом воды на фильтрах. Если общий расход увеличивается, то уровень воды перед фильтрами повышается и основной регулятор увеличивает заданный расход воды на каждом фильтре, пока общий уровень перед фильтрами не стабилизируется, что свидетельствует о соответствии расхода фильтрованной воды расходу воды, поступающей на станцию. На рис. 9.58 показана система управления этого типа с пневматическими регуляторами. Она будет аналогичной для электрических или пневматических регуляторов.

Таким образом, расход фильтруемой воды устанавливается до того, как вода поступает на станцию, и общая система регулирования выпускает расход фильтрованной воды, равный расходу поступающей, распределяя ее равномерно по всем фильт-

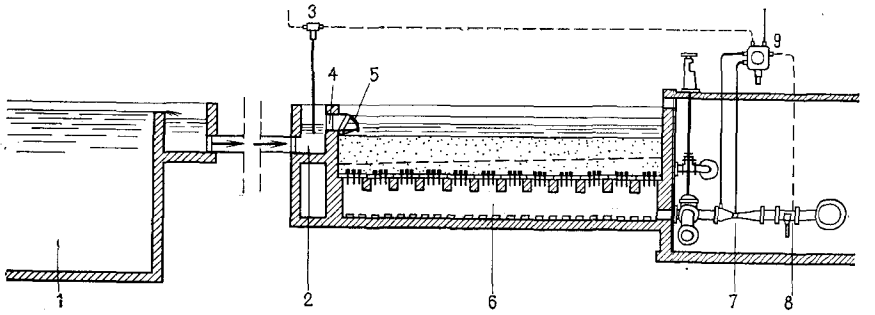


Рис. 9.58. Схема регулирования на входе с измерением расхода обрабатываемой воды; система управления должна поддерживать этот расход и распределять его равномерно между всеми фильтрами, находящимися в работе

1 — отстойник; *2* — канал для подачи воды; *3* — импульсная трубка; *4* — впускные отверстия; *5* — автоматический клапан на впуске воды; *6* — фильтр; *7* — вставка Вентури; *8* — регулирующий клапан; *9* — регулятор расхода

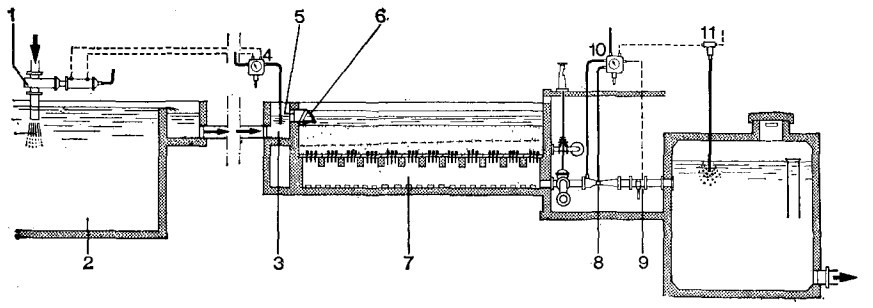


Рис. 9.59. Схема регулирования расхода обрабатываемой воды на выходе (он должен быть равен расходу очищенной воды на выходе). Расход должен быть равномерно распределен между всеми фильтрами, находящимися в работе

1 — пневматический клапан регулирования подачи воды на станцию; *2* — отстойник; *3* — канал для подачи на фильтры отстоенной воды; *4* — пневматический регулятор; *5* — калиброванные впускные отверстия; *6* — автоматический клапан на впуске; *7* — фильтр; *8* — вставка Вентури; *9* — регулирующий клапан; *10* — регулятор расхода; *11* — пневматическое устройство сигнализации уровня в резервуаре фильтрованной воды

рам. Расход фильтруемой воды можно устанавливать по заданной программе или по уровню в резервуаре фильтрованной воды.

При регулировании общего расхода на выходе регулятор определяет уровень воды в резервуаре фильтрованной воды и корректирует в соответствии с этим уровнем индивидуально установленные расходы для каждого фильтра. Другой общий регулятор, установленный в канале подачи воды на фильтры, определяет уровень в этом канале и поддерживает его (от 10 до 30 см), воздействуя на орган, регулирующий расход воды, поступающей на станцию, подавая на фильтры количество воды, равное заранее установленному расходу фильтрованной воды.

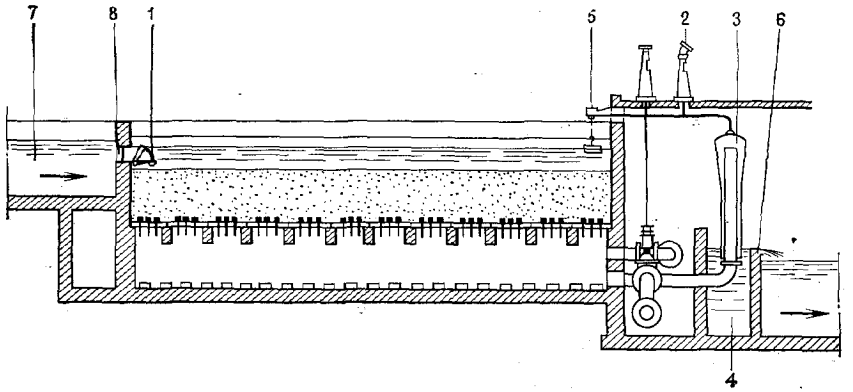


Рис. 9.60. Схема регулирования на входе, обеспечивающего равномерное распределение воды между фильтрами Аквазер (при поддержании постоянного уровня)

1 — клапан на впуске воды; *2* — индикатор потерь напора; *3* — концентрический сифон; *4* — камера для фильтрованной воды; *5* — пневматический клапан управления сифоном (уравнительная камера); *6* — водослив на выпуске фильтрованной воды; *7* — канал для отстоенной воды; *8* — калиброванные отверстия

На рис. 9.59 показан тип каскадного регулятора с регулированием на выходе.

Регулирование при поддержании постоянного уровня. Чтобы иметь на каждом фильтре постоянный расход воды, может быть использован принцип постоянного уровня. В этом случае общий расход воды равномерно распределяется между фильтрами. Их выпускная система регулируется устройствами, расположенными до или после фильтра и поддерживающими постоянный уровень воды (этот уровень принят за точку сравнения).

● Регулирование на входе (рис. 9.60). Расход воды, поступающей на станцию, сначала равномерно распределяется между фильтрами.

Каждый фильтр имеет датчик, который поддерживает уровень перед фильтром постоянным, воздействуя на регулирующий орган на выпуске. Поскольку уровень перед фильтром поддерживается постоянным, расход воды на выходе равен входному, а забивание можно компенсировать до тех пор, пока потери напора не достигнут максимального значения.

● Равномерное распределение расхода (рис. 9.60). Уравнительная камера *7*, показанная на схеме фильтра «Аквазер Т» (ср. с. 286), является составной частью оборудования каждого фильтра. Она поддерживает постоянный уровень, одинаковый для всех фильтров. Фильтры снабжаются водой из общего канала, в котором благодаря низкой скорости уровень воды практически горизонтален. Потери напора, задаваемые калиброванными отверстиями *1*, таким образом одинаковы для всех

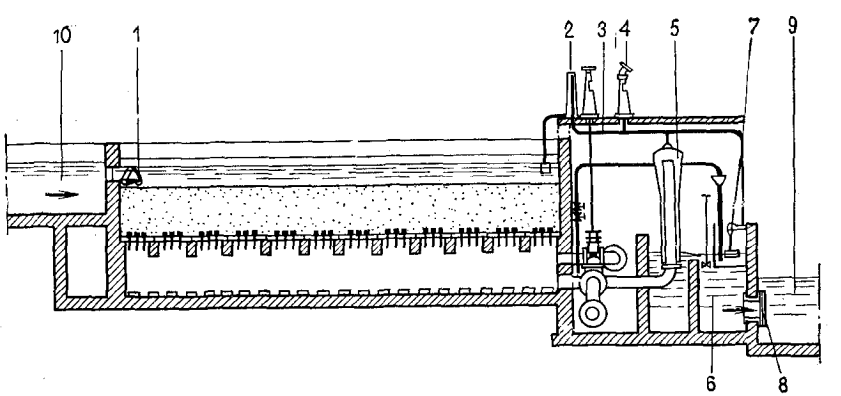


Рис. 9.61. Схема регулирования фильтров «Аквазер» на выходе, обеспечивающая равномерное распределение воды (с поддержанием постоянного уровня)

1 — клапан на впуске сырой воды; *2* — петля, предотвращающая сброс воды ниже уровня загрузки; *3* — труба медленного запуска фильтра; *4* — индикатор забивания; *5* — концентрический сифон; *6* — камера для фильтрованной воды; *7* — уравнительная камера; *8* — калиброванные отверстия; *9* — канал для фильтрованной воды; *10* — канал для отстоенной воды

фильтров, что обеспечивает равномерное распределение фильтруемой воды.

● Регулирование и компенсация потерь напора при забивании фильтра. Уравнительная камера *7* воздействует на исполнительный механизм на выходе (сифон *5*) таким образом, чтобы обеспечить равенство расходов на входе и выходе. Если расход поступающей на фильтр воды увеличится, уровень стремится подняться и регулирующий клапан сифона увеличит подачу воздуха, и наоборот. Когда фильтр забивается, уровень воды на входе также стремится подняться. В этом случае уравнительная камера действует так, как это описано выше. Таким образом, потери напора компенсируются.

Если фильтр остановлен, общий расход автоматически распределяется между работающими фильтрами (за исключением фильтров с системой поверхностной промывки, когда вода продолжает поступать на промываемый фильтр). При этом предотвращается риск, что фильтрующая загрузка окажется сухой, поскольку, если уровень воды упадет, уравнительная камера откроется полностью и разрядит сифон.

● Регулирование на выходе (рис. 9.61). Уравнительные камеры, установленные на каждом фильтре, отрегулированы так, чтобы поддерживать постоянный уровень в камерах фильтрованной воды каждого фильтра. Уровень в общем канале фильтрованной воды горизонтален, и все калиброванные отверстия *9* работают при одном и том же напоре, обеспечивая одинаковый расход из камеры фильтрованной воды каждого фильтра, равный общему расходу, деленному на число фильтров. Таким образом, расход на выходе оказывается равномерно распределенным.

Когда уровень воды в общем канале фильтрованной воды падает (в результате увеличения расхода потребителем), из каждой камеры фильтрованной воды поступает бо́льший расход и уровень в них начинает снижаться. Уравнительные камеры *7* воздействуют на сифоны *5* и тем самым повышают расход до тех пор, пока он не станет соответствовать требуемому.

Если фильтр остановлен, общий потребный расход автоматически распределяется между работающими фильтрами.

Сравнение различных методов регулирования. Общеизвестно, что качество фильтрованной воды будет лучше, если расход поддерживается постоянным или если изменения в условиях работы станции происходят достаточно медленно.

Лучшей системой регулирования признана та, которая основана на применении простых и надежных датчиков и обеспечивает плавное изменение параметров на переходных режимах, что достигается установкой этих датчиков в местах, где вода имеет максимальную площадь свободной поверхности.

С этих позиций регулирование на входе всей системы фильтров обеспечивает наиболее плавную их работу. В то же время регулирование при помощи уравнительного сифона или электрогидравлического регулятора предпочтительнее, чем применение пневматического регулятора, который, как известно, слишком чувствителен даже к самому незначительному засорению.

9.6.3. ФИЛЬТРЫ БЕЗ РАВНОМЕРНОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВОДЫ И ИНДИВИДУАЛЬНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ (С ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТЬЮ ФИЛЬТРОВАНИЯ)

Существуют фильтровальные станции с фильтрами, которые не оборудованы ни системами регулирования уровня, ни индивидуальной системой регулирования. Это относится к некоторым напорным фильтрам, а также к открытым фильтрам, работающим с переменным расходом воды.

В данной системе все фильтры снабжаются водой из одного и того же трубопровода или канала, при этом нет необходимости беспокоиться о равномерном распределении расхода. В этом ее преимущество, поскольку можно избежать разрушения хлопьев скоагулированных частиц, что часто затрудняет фильтрование, если частицы обладают малой прочностью.

Фильтрованная вода от каждого фильтра поступает в индивидуальные камеры с водосливами, расположенными выше верха фильтрующей загрузки, которая остается покрытой водой даже во время остановок фильтра или его работы при небольших расходах воды.

Выпускной канал каждого фильтра оборудован клапаном фильтрата *7*, открытого или закрытого, продублированного другим клапаном *8*, с помощью которого в систему вводятся дополнительные потери напора. Скорость подачи сырой воды регулируется клапаном *1* в соответствии с уровнем воды в резервуаре фильтрованной воды *11* с помощью датчика уровня воды *12* и основного регулирующего прибора *13*.

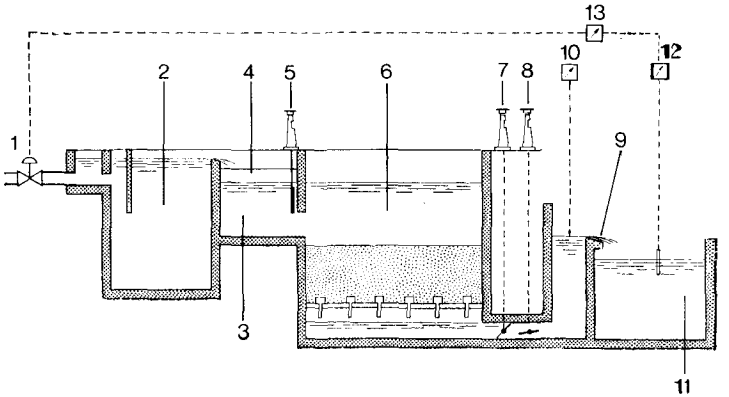


Рис. 9.62. Схема управления работой фильтрами со снижающейся скоростью фильтрования

1 — клапан на впуске сырой воды; *2* — отстойник; *3* — распределительный канал фильтров; *4* — переливной водослив; *5* — впускной канал; *6* — фильтр со снижающейся скоростью фильтрования; *7* — клапан на выпуске фильтрата; *8* — клапан для установки дополнительного сопротивления; *9* — выпускной водослив для каждого фильтра; *10* — измеритель расхода на каждом фильтре; *11* — общий резервуар фильтрованной воды; *12* — измеритель уровня в резервуаре фильтрованной воды; *13* — регулятор расхода сырой воды

В устройствах этого типа дополнительные потери напора P клапаном *8* вводятся таким образом, что при максимальном расходе Q, который обрабатывается на станции:

- индивидуальный расход на фильтр изменяется в соответствии со степенью забивания на величину $\pm m$, % среднего расхода, который равен Q/N, где N — число работающих фильтров. Таким образом, производительность фильтра, который только что промыт, составляет $\left(1+\frac{m}{100}\right)\frac{Q}{N}$, в то время как производительность того же фильтра перед промывкой составит $\left(1-\frac{m}{100}\right)Q/N$. Значение m колеблется в диапазоне 20—40% в зависимости от предварительно установленной средней скорости;
- потери напора, обусловленные забиванием фильтра, должны, когда они восстанавливаются до значения, соответствующего средней скорости фильтрования, достигнуть нормальной величины, определяемой природой воды и схемой ее обработки, т. е. от 1,75 до 2 м.

Эти два условия определяют величину дополнительного сопротивления P и геометрическую высоту, которая должна быть обеспечена на фильтрах.

В устройстве, показанном на рис. 9.62, расход сырой воды регулируется по уровню воды в резервуаре фильтрованной во-

ды, что приводит к изменению уровней воды на фильтрах. С другой стороны, можно выбрать тип устройства, в котором расход поступающей воды контролируется иначе, что позволяет поддерживать уровень воды на фильтрах близким к постоянному. Это вызывает необходимость регулировать уровень воды после фильтров и работу систем перекачки фильтрата.

Для работы фильтров с убывающим расходом воды необходимо знать индивидуальные скорости фильтрования на фильтрах. В устройстве, показанном на рис. 9.62, это осуществляется измерением глубины воды на водосливах на выходе воды из камеры фильтрованной воды.

Данный метод регулирования фильтров характеризуется:

наличием на впуске воды клапана со значительной площадью поперечного сечения для избежания чрезмерных потерь напора;

наличием значительного слоя воды над поверхностью фильтрующей загрузки;

большей глубиной фильтра и, следовательно, бóльшими строительными объемами, чем требуются для фильтров, работающих при такой же средней скорости;

меньшей геометрической высотой, чем для батареи фильтров, работающих при эквивалентной средней скорости фильтрования с переменным убывающим расходом, и при одинаковых потерях напора;

худшим качеством фильтрата в начале фильтроцикла из-за повышения скорости фильтрования в начале цикла;

более высоким качеством фильтрата в конце фильтроцикла, обусловленным снижением скорости фильтрования, что исключает возможность проскоков загрязнений;

бóльшей длительностью отключения фильтров на промывку. Необходимо отмыть загрязнения, задержанные загрузочным слоем, затем нужно промыть фильтр и постепенно пустить его в работу. Выполнение этих операций может занимать более часа на каждом фильтре и обычно требует отключения двух фильтров одновременно (один из них опорожняется, а другой промывается), что увеличивает на одну единицу требуемое число фильтров по сравнению с традиционными системами;

относительной простотой управления при условии, что обеспечивается постоянство общего расхода и качество фильтруемой воды;

необходимостью более тщательного надзора в следующих обстоятельствах;

● при изменении общего расхода сырой воды, поскольку оно вызывает изменения дополнительного сопротивления, устанавливаемого клапаном *8* (чтобы обеспечить адекватное приращение потерь напора, отсутствие которых способствует существенному снижению удельной производительности фильтра);

● при быстром изменении качества исходной воды, поскольку уровень в канале осветленной воды быстро поднимается из-за невозможности промыть фильтры с достаточной скоростью, так как это может вызвать значительные потери воды через переливную систему, которая должна быть предусмотрена перед фильтрами.

9.7. КОНТРОЛЬ ЗА РАБОТОЙ И АВТОМАТИЗАЦИЯ ФИЛЬТРОВ

9.7.1. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ

В зависимости от типа фильтра и принятой системы регулирования непрерывный контроль можно осуществлять:

● по степени забивания фильтрующей загрузки в «масштабе потерь напора», которые можно измерять либо положительным, либо отрицательным давлением (при регулировании сифоном). В тех случаях, когда желательно расположить все приборы для визуального наблюдения и оборудование для записи потерь напора на центральном пункте управления, это оборудование должно быть способно передавать сигнал дистанционно. Если цикл промывки управляется по степени забивания фильтрующей загрузки, достигающей некоторого уровня, необходимо предусмотреть запас напора для настройки регулятора на масштаб потерь напора;

● по степени открытия или закрытия клапанов; такую информацию могут давать концевые выключатели на клапанах;

● по расходу фильтрованной воды, подаваемой каждым фильтром. Обычно этот контроль целесообразно применять для фильтров с регуляторами расхода, но не для фильтров, регулируемых по уровню при равномерном предварительном распределении воды;

● по расходу воздуха и промывной воды (что не всегда необходимо). Если используется объемная воздуходувка, расход воздуха будет правильным. Что касается расхода воды для промывки, то его нужно измерять только на фильтрах, где его необходимо регулировать, чтобы обеспечить требуемую степень расширения в соответствии с размером зерна фильтрующего материала. Этот вид контроля применим к фильтрам с промывкой одной водой или воздухом и водой последовательно. С другой стороны, на фильтрах «Аквазер» с песчаной загрузкой, где основная промывка осуществляется одновременно воздухом и водой, нет надобности измерять расход «отмывочной» воды, поскольку он не вызывает расширения загрузки. Необходим лишь правильный подбор насосного оборудования. Однако все-таки полезно измерять расход воды при обратной промывке, чтобы оценить общее количество воды, израсходованной на эту операцию;

● по мутности фильтрованной воды. Иногда достаточно измерять мутность в общем канале фильтрованной воды на выходе.

Все рассмотренные способы контроля дают возможность корректировать режим фильтрования или промывки, когда это необходимо, в соответствии с изменением свойств сырой воды.

Было бы идеально осуществлять запись мутности на выходе каждого фильтра.

9.7.2. АВТОМАТИЗАЦИЯ

Управление фильтровальной станцией может быть существенно облегчено автоматизацией работы клапанов, входящих в состав оборудования, с помощью дистанционной кнопочной системы управления. Такие системы известны под названием вспомогательных систем управления. Они не являются автоматизированными в прямом смысле этого слова, поскольку установление последовательности операций промывки, порядок проведения которых они осуществляют, и их продолжительность остаются за оператором.

Три типа систем автоматизации (см. гл. 19) применимы для управления операциями промывки, осуществляемыми на фильтровальных станциях. Они включают:

● дистанционное ручное управление последовательностью промывок; в этом случае оборудование для управления фильтрами может быть выполнено по схеме «цикломатик» (кнопочная система, связанная с реле, управляющими заданной последовательностью промывки; порядок ее контролируется промежуточными электрическими регуляторами). Обычно оборудование монтируется на консоли рядом с фильтром;

● автоматическое последовательное регулирование с ручным пуском; в этом случае возможно либо индивидуальное расположение регулирующего оборудования на каждом фильтре (как в предыдущем случае), либо расположение контрольных систем каждого фильтра на центральном диспетчерском пункте;

● автоматическое последовательное регулирование с автоматическим пуском; в случаях, когда используется эта система, автоматизация процесса промывки основывается на потерях напора, достигающих максимального уровня, хотя могут быть использованы и другие параметры (объем профильтрованной воды, мутность фильтрата или длительность фильтроцикла). В каждом из этих случаев система автоматического регулирования управляется по одному или нескольким из этих параметров.

Поскольку часть оборудования для промывки, а именно насосы и воздуходувки обычно рассчитаны на группу фильтров, одновременная промывка нескольких фильтров, относящихся к одной группе, невозможна. Следовательно, пока один из фильтров находится на промывке, сигналы о необходимости промывки, поступающие от других фильтров, накапливаются запоминающим устройством и затем выдаются обратно в систему автоматического регулирования в том порядке, в котором они поступили в запоминающее устройство, либо в соответствии с другой, установленной последовательностью.

10. ИОННЫЙ ОБМЕН

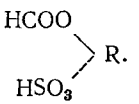
10.1. СВОЙСТВА ИОНООБМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ионообменные материалы для промышленного использования обладают следующими особенностями:

1. В химической структуре ионитов, в основном макромолекулярной, содержатся кислые или основные активные ионогенные группы.

Присутствие этих ионогенных групп объясняет способность кислотных ионитов в H — R-форме обменивать катионы и основных ионитов в R — OH-форме обменивать анионы. Сила кислотных или основных ионитов зависит от природы матрицы и активных ионогенных групп, фиксированных на ней COOH, HSO_3, NH_3OH и т. д.

Ионообменные материалы называются монофункциональными, если они содержат ионогенные группы только одного вида, например $COOH^-$ или SO_3H^+, и полифункциональными, если их молекулы содержат одновременно различные ионогенные группы, обладающие различной ионной силой, например:



2. Материал должен быть нерастворим в обычно практикуемых условиях. Практически все ионообменные материалы, используемые в настоящее время, отвечают этому требованию. Их истинную растворимость при температуре окружающей среды безотносительно к начальному периоду невозможно обнаружить принятыми методами анализа. Это не относится к ионообменным материалам, которые были нагреты до определенных температур.

3. Материал должен иметь форму гранул (как можно более однородных) таких размеров, чтобы потери напора в режиме фильтрования были приемлемы.

4. Изменения в состоянии ионообменного материала не должны сопровождаться разрушением его физической структуры.

Ионообменные материалы могут быть использованы для фиксации ионов или ионизированных комплексов с большим

диапазоном размеров молекул и их массы. В некоторых случаях в процессе ионного обмена происходит существенное разбухание или сжатие материала: до 100% для некоторых карбоксильных смол (HCOOR) при обмене катионов H^+ на NH^+_4. Такое разбухание или сжатие не должно, очевидно, вызывать растрескивания или разрушения гранул. При проектировании аппаратов для наиболее трудных случаев следует учитывать подобное расширение без возникновения слишком больших напряжений в слое загрузки.

Никогда не следует забывать о существующих ограничениях в использовании ионообменных материалов:

- ионный обмен возможен только в присутствии жидкой фазы, концентрация которой ограничена, и не пригоден для других целей;
- ионообменные материалы предназначены для извлечения ионов, но не для отфильтровывания взвешенных и коллоидных веществ или масляных эмульсий. Последние могут только сократить срок службы ионообменных материалов. При проектировании должны быть учтены осложнения, возникающие при наличии в воде растворимых органических веществ;
- *присутствие большого количества* растворенных газов в воде может вызвать серьезные нарушения активности ионообменных материалов;
- сильные окислители Cl_2 и O_3 разрушают многие смолы;
- при практическом использовании результатов лабораторных исследований и изучении паспортных данных поставляемых ионообменных материалов необходимо проявлять крайнюю осторожность.

Соблюдение правил по использованию и проектированию оборудования столь же важно, как и знание свойств ионообменных материалов.

Применяемые ионообменные материалы имеют форму гранул с размерами 0,3—1,2 мм. В особых случаях (для обработки конденсатов, вод из оборотных циклов ядерных установок) применяют порошкообразные смолы, известные как микросмолы.

10.2. СЛОВАРЬ ПО ИОНООБМЕНУ

Обменная емкость ионообменных материалов — это масса ионов, которые могут быть извлечены единицей объема (или в исключительных случаях единицей массы) рассматриваемого ионообменного материала. Она выражается в грамм-эквивалентах на литр смолы в плотном состоянии или в градусах на единицу объема; эквивалент градуса, выраженный в грамм-эквивалентах, различен в различных странах (французские градусы, немецкие и т. д.).

Существуют различия между понятиями полная обменная емкость (величина, представляющая собой массу ионов, которые могут быть обменены, она характеризует свойства данной ионообменной смолы) и полезная емкость, которая представляет собой часть полной обменной емкости и изменяется в зависимости от гидравлических и химических условий работы ионитов.

Объемная нагрузка: отношение объема жидкости, обрабатываемой за 1 ч, к объему смолы.

Нагрузка по ионам. Объемная нагрузка, умноженная на солесодержание воды (число ионов в мг-экв, поступивших на 1 л смолы в 1 ч).

Регенерационное отношение. Масса реагента, используемого для регенерации единицы объема ионообменного материала.

Эффективность регенерации выражается отношением количества использованного регенерирующего реагента, г-экв, к количеству реагента, г-экв, соответствующему стехиометрическому количеству удаленных ионов.

Эффективность удаления ионов представляет собой отношение концентрации удаляемых ионов в жидкости после и до обработки; она выражается в %.

Механическая прочность — износ гранул в процессе их использования.

10.3. ИОНООБМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Существуют две основные группы ионообменных материалов:

катионообменные, в которых молекулы содержат кислотные, карбоксильные или сульфогруппы типов SO_3H или COOH, способные фиксировать минеральные или органические катионы и обменивать их либо друг на друга, либо на ион водорода H^+;

анионообменные, содержащие основные группы, например третичные амины или четвертичные производные аммония, способные фиксировать минеральные или органические анионы и обменивать их на гидроксильный ион OH^-.

10.3.1. КАТИОНООБМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Минеральные катионные ионообменные материалы и сульфоугли представляют собой только исторический интерес.

Синтетические катионообменные материалы могут быть разделены на две группы: сильнокислотные ионообменные материалы с сульфогруппами SO_3H и кислотностью, близкой к кислотности серной кислоты, и слабокислотные ионообменные материалы с карбоксильными группами COOH, подобные по силе органическим кислотам, таким как муравьиная или уксусная.

Сульфированные полистиролы составляют бóльшую часть катионообменных материалов, применяемых в настоящее время. Все они получены одинаковым путем: сополимеризацией стирола и дивинилбензола в виде эмульсии для получения идеальных сфер при затвердевании, и последующим сульфированием полученного таким образом материала. Все эти продукты фактически являются монофункциональными. Их физические и химические свойства зависят от процентного соотношения дивинилбензола и стирола, определяющего степень поперечной связанности полимерной основы ионита, и изменяющейся обычно от 6 до 16%.

Многие фирмы выпускают материалы такого качества под различными фирменными названиями (табл. 10.1).

ТАБЛИЦА 10.1

Поставщик	Сульфонированные полистиролы	
	находящиеся в обращении	с высокой степенью поперечного сцепления молекул
«Байер» (ФРГ)	Леватит S 100	Леватит SP 120
«Диа-Прозим» (Франция) и «Дайомонд Шамрок» (США)	Диолит С 20	Диолит С 26, С или С1
«Доу Кемикэл» (США)	Доувекс HCR-8 и	Доувекс MSC-1
«Имакти» (Голландия)	Имак С 12	Имак С 16 Р
«Монтэдисон» (Италия)	Кастель С 300	Кастель С 300 AGR—P
«Резиндион» (Италия)	Релит CF	Релит CFS
«Ром и Хаас» (США)	Амберлит IP 120	Амберлит IP 200
«Зеролит» (Англия)	*Z* 225	*Z* 625

В табл. 10.1 (вторая колонка) приведен перечень материалов, используемых в настоящее время в ионообменных фильтрах для обработки воды среднего качества в условиях умеренных скоростей фильтрования. Эти материалы непригодны для обработки воды (в непрерывном либо периодическом режиме) при высоких скоростях или при многократных циклах, или при обработке вод, содержащих окислители.

Для промышленного использования выпускают также специально разработанные смолы, в основном макропористые, с высокой степенью поперечной связанности. Многие из них хорошо известны (см. табл. 10.1, третью колонку).

Карбоксилированные ионообменные материалы с общей формулой HCOO-R слабокислотные. При обработке воды они могут освобождать угольную кислоту, фиксируя Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+} и другие катионы соответствующих бикарбонатов, но не могут обменивать катионы, находящиеся в равновесии с сульфатами, хлоридами или нитратами. Такие ионообменные материалы выпускаются в широком ассортименте. Вот некоторые из них:

Поставщик	*Наименование продукта*
«Байер»	Леватит CP 80
«Диа-Прозим»	*Диолит* CC 3
«Доу Кемикэл»	Доувекс CCR 2
«Монтэдисон»	Кастель С 100
«Резиндон»	Релит CC
«Ром и Хаас»	Амберлит IRC 50 IRC 84
«Зеролит»	*Z* 236

10.3.2. АНИОНООБМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Анионообменные материалы можно разделить на две большие группы: слабо- или среднеоснóвные и сильнооснóвные.

Практически они различаются следующим:

- слабооснóвные ионообменные материалы не фиксируют очень слабых кислот, таких как угольная или кремниевая кислоты, но сильнооснóвные материалы фиксируют их полностью;
- сильнооснóвные материалы сами по себе способны освобождать основания из их солей по следующей стандартной реакции:

$$ROH + NaCl \rightleftarrows RCl + NaOH;$$

- слабооснóвные материалы более или менее чувствительны к гидролизу, в результате которого предварительно фиксированные на смоле анионы замещаются гидроксил-ионом:

$$RCl + H_2O \rightleftarrows ROH + HCl.$$

Между тем сильнооснóвные материалы почти не чувствительны к этому явлению.

Слабо- или среднеоснóвные аниониты состоят из смеси первичных, вторичных, третичных и иногда четвертичных аминов. Активные группы этих анионитов отличаются большим разнообразием и могут быть алифатическими, ароматическими или гетероциклическими. Вот неполный перечень смол этого типа:

Поставщик	*Продукт*
«Байер»	Леватит MP 62, MP 64
«Диа-Прозим»	Диолит А 30 В, А 368, А 369
«Доу Кемикэл»	Доувекс WGP
«Имакти»	Имак А 20 S
«Резиндон»	Релит 4 MS
«Ром и Хаас»	IRA 93, IRA 94
«Зеролит»	H(ip)

Некоторые из перечисленных смол имеют макропористую структуру.

Сильноосновные аниониты. Типичным для этих материалов является присутствие в их молекуле четвертичного аммониевого основания. Все сильнооснóвные смолы, которые используются

ТАБЛИЦА 10.2

Поставщик	Смолы	
	типа I	типа II
«Байер»	Леватит М 500 М 504	Леватит М 600
«Диа-Прозим»	Диолит А 101D	Диолит А 102
«Доу Кемикэл»	Доувекс SBR	Доувекс SARD
«Монтэдисон»	А 500	А 300
«Резиндон»	Релит 3 А	Релит 2 А
«Ром и Хаас»	Амберлит IRA 400 IRA 402	Амберлит IRA 410
«Зеролит»	FF (ip)	N (ip)

для деминерализации, относятся к двум группам, обычно известным как типы I и II.

Смолы типа I состоят из простых четвертичных аммонийных радикалов, а смолы типа II — из алкилированных четвертичных аммонийных радикалов. Смолы каждого типа имеют свою область применения в зависимости от природы воды, которая подвергается обработке, и условий проведения регенерации.

Смолы этих типов различаются тем, что у первых, сильноосновных, емкость низкая и эффективность регенерации плохая, а у вторых, хотя основность не столь велика, но емкость больше и эффективность регенерации также лучше. Перечень наиболее широко применяемых смол приведен в табл. 10.2.

В настоящее время выпускается большое количество ионообменных смол с высокой степенью пористости. Их называют макропористыми или макроретикулярными, изопористыми, гомопористыми. Опыт показывает, что применение материалов такого типа выгодно вдвойне:

во-первых лучше результаты обработки воды и выше стойкость против загрязнения в присутствии воды, содержащей органические коллоиды. Процент органических веществ, которые фиксируются этими смолами, больше чем у обычных смол, но процент их удаления при регенерации также выше;

ТАБЛИЦА 10.3

Поставщик	Смолы	
	типа I	типа II
«Байер»	Леватит МР 500	Леватит МР 600
«Диа-Прозим»	Диолит А 161	Диолит А 162
«Доу Кемикэл»	Доувекс MSA 1	—
«Имакти»	Имак S 5 40	Имак S 5 42
«Монтэдисон»	Кастель А 500 Р	Кастель А 300 Р
«Резиндон»	Релит 3 А S	Релит 2 А S
«Ром и Хаас»	Амберлит IRA 900	Амберлит IRA 910
«Зеролит»	MP F	MP N

во-вторых, лучше сопротивление как физическим нагрузкам (изменение давления), так и химическим (изменение состояния ионного насыщения).

К этим материалам можно отнести смолы, приведенные в табл. 10.3.

10.4. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИОНООБМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Все технологические процессы, описанные в этой главе, относятся к ионообменным и не могут быть использованы, если сырая вода не подвергается той или иной предварительной обработке, соответствующей составу воды. Такая обработка может включать удаление взвешенных и органических веществ, остаточного хлора, хлораминов и т. д. Характер предварительной обработки изменяется в зависимости от типа применяемых ионообменных материалов.

10.4.1. НЕПОДВИЖНАЯ ЗАГРУЗКА С НАПРАВЛЕНИЕМ ПОТОКА ПРИ РЕГЕНЕРАЦИИ СВЕРХУ ВНИЗ

Рабочий цикл ионообменных материалов зависит от обменной емкости, ограниченной массой ионов, способных к обмену и, следовательно, некоторым объемом воды, обрабатываемой между двумя операциями регенерации.

Цикл включает четыре фазы: фиксацию (вода проходит сквозь слой сверху вниз), расширение слоя ионообменной смолы обратным потоком, регенерацию (соответствующим образом приготовленный регенерирующий раствор проходит через загрузку сверху вниз) и промывку (удаление регенерационного раствора в результате промывки водой сверху вниз).

Рассмотрим основные характеристики ионообменных установок. Независимо от типа ионного обмена, будет ли это умягчение, удаление карбонатов или обессоливание, оборудование обычно состоит из вертикального закрытого цилиндрического резервуара, заполненного ионообменной смолой. Последняя может непосредственно контактировать с устройством для сбора обработанной воды, состоящим либо из колпачков равномерно рассредоточенных по поверхности днища, либо из системы перфорированных труб определенного размера. Ионообменная смола может быть уложена на поддерживающие слои из инертного гранулированного материала (силекс, антрацит или пластмассы); отвод воды осуществляется дренажной системой (рис. 10.1).

Для обеспечения возможности расширения слоя загрузки (от 30 до 100% плотного объема в зависимости от типа смолы) над слоем загрузки оставляют свободное пространство.

Обрабатываемую воду и регенерационные растворы впускают в верхнюю часть резервуара через систему распределения различной сложности.

Установки оборудованы задвижками, установленными снаружи, и трубами для проведения различных операций: фиксации, расширения, регенерации и промывки. Задвижки имеют ручное или автоматическое управление или могут быть заменены центральным многоходовым клапаном. Ионообменные установки применяют для трех основных целей: умягчения, удаления карбонатов, полного обессоливания.

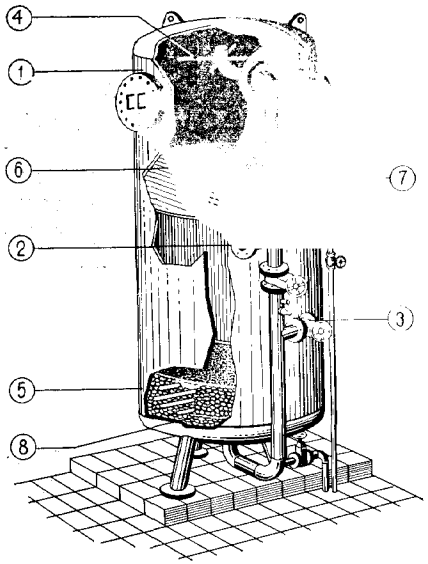


Рис. 10.1. Схема аппарата для умягчения воды

1 — корпус; *2* — вентиль подачи сырой воды; *3* — выпуск обработанной воды; *4* — распределитель исходной воды; *5* — коллектор для сбора обработанной воды; *6* — выпуск регенерирующего раствора; *7* — ионообменная смола; *8* — поддерживающий слой

Примечание. При последующем изложении материала принимаем, что реакции протекают полностью. На практике же всегда имеет место небольшой проскок ионов.

10.4.1.1. Умягчение. Для этой цели используют катионообменные материалы, которые регенерируются раствором хлористого натрия. Все соли в обрабатываемой воде переходят в соли натрия.

Жесткость обработанной воды практически близка к нулю, pH и щелочность остаются неизменными.

Умягчение может осуществляться после предварительной обработки известью; в результате такого процесса очистки из воды удаляются бикарбонаты и общая щелочность снижается до 0,4—0,8 мг-экв/л. В этом случае вода одновременно декарбонизируется и умягчается.

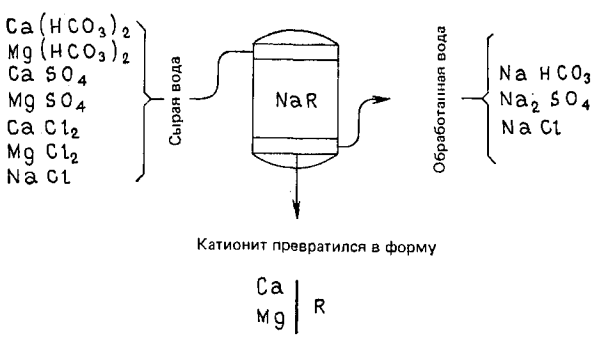


Рис. 10.2

10.4.1.2. Удаление карбонатов ионообменными смолами. Для этих целей используются карбоксилированные смолы в форме HR, предварительно регенерированные кислотой. Они обладают способностью фиксировать катионы металлов и освобождать соответствующие анионы в форме свободной кислоты до тех пор, пока pH обработанной воды не достигнет уровня 4—5, что соответствует освобождению из бикарбонатов всей угольной кислоты. Катионы, связанные с анионами сильных кислот (хлориды, нитраты, сульфаты), не фиксируются на этих смолах.

В таких условиях обработанная вода содержит все первоначальные соли сильных кислот и растворенную углекислоту в количестве, пропорциональном количеству бикарбонатов в исходной воде. Щелочность воды может быть равна нулю, а ее жесткость — разнице общей жесткости и общей щелочности сырой воды. Поэтому значение жесткости может падать до нуля, если общая жесткость равна или меньше общей щелочности, поскольку ионообменная смола более легко обменивает ионы щелочно-земельных металлов, чем щелочные ионы.

Если $Ж_{общ} > ОЩ$, нулевая жесткость может быть получена путем комбинирования в одном аппарате слоев карбоксилированной и сульфированной смол, регенерируемых поочередно сильной кислотой и раствором хлористого натрия.

Если обрабатываемая вода содержит бикарбонат натрия, эффективность фиксирования карбоксилированными смолами не удовлетворительна. Вместо этого иногда используют метод H—Na-катионирования: сульфированная смола в H-форме работает параллельно с другой, в форме Na-катионита, и в то время как первая фиксирует все катионы и освобождает соответствующие кислоты, вторая умягчает воду.

Смесь катионированной и умягченной воды в надлежащих пропорциях обеспечивает получение воды такого же качества, как и в предыдущем процессе. Недостатком этого метода является необходимость строгого соблюдения пропорции при смешении вод, поскольку иначе образуется кислая, а стало быть, коррозионная смесь.

В таких схемах желательно удалять растворенную CO_2, образующуюся при ионообменных процессах.

10.4.1.3. Полное обессоливание. В простейших системах вода последовательно проходит через катионит, регенерируемый кислотой, и анионит, регенерируемый каустической содой. После прохождения через катионит все катионы задерживаются на этой смоле и в воде не остается больше ничего, кроме кислот солей, содержащихся в воде первоначально.

Анионит предназначен для удаления этих кислот и может быть: либо слабоосновной смолой, способной задерживать

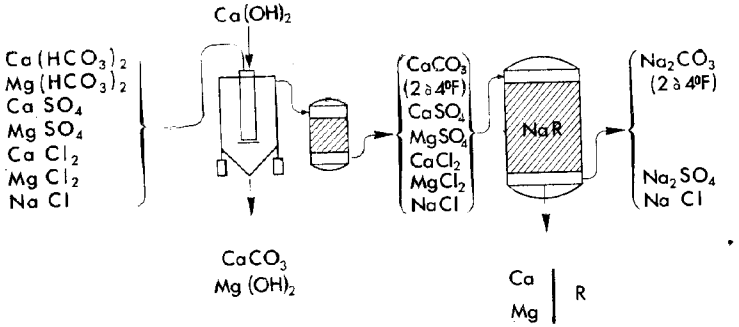


Рис. 10.3

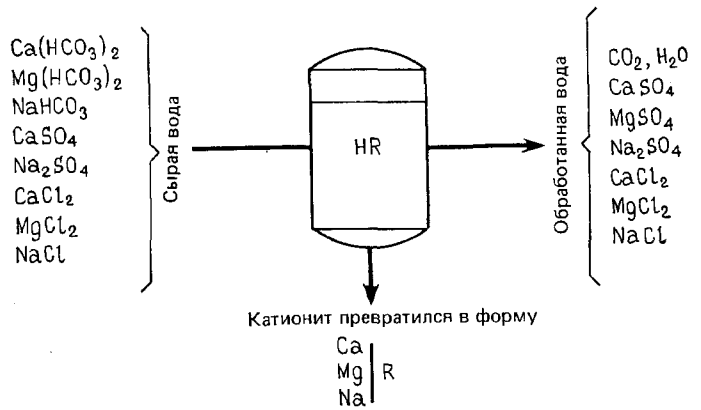


Рис. 10.4

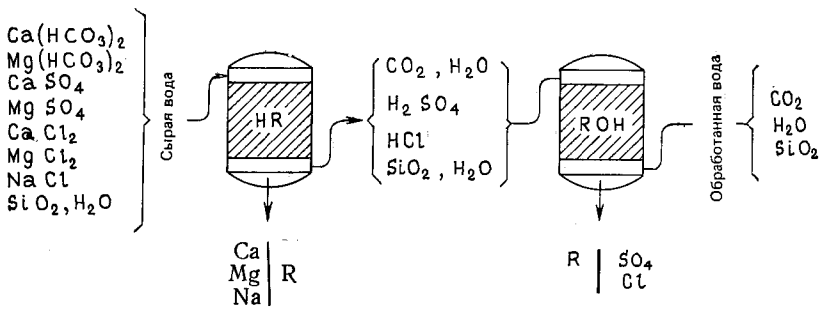


Рис. 10.5

сильные анионы, но не такие слабые, как CO_2 или кремниевая кислота (рис. 10.5), либо сильноосно́вной смолой, которая одновременно задерживает как сильные, так и слабые анионы, включая угольную и кремниевую кислоты. Однако в этом случае советуют проводить удаление CO_2 физическими методами с

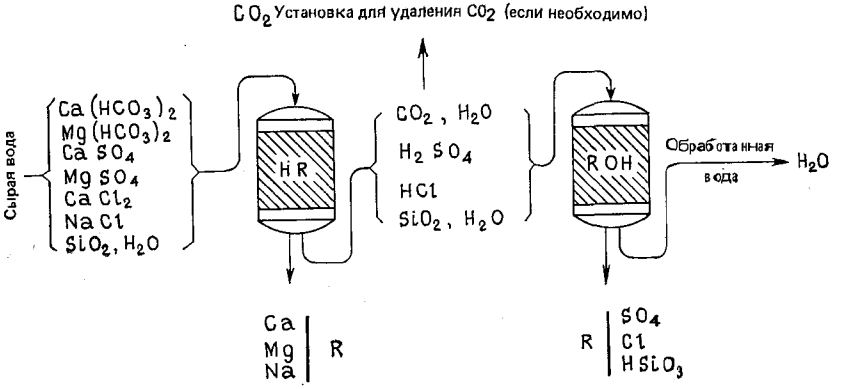


Рис. 10.6

целью снижения расхода реагента, используемого для регенерации анионита (по крайней мере в тех случаях, когда диоксид углерода составляет существенную часть солесодержания).

Расчет установок. Для расчета установок необходимо иметь следующие данные:

общую щелочность сырой воды, мг-экв/л (*ОЩ*);

концентрацию солей сильных кислот ($SO_4^{2-}+Cl^-+NO_3^-$); в сырой воде (ССК);

содержание кремниевой кислоты по SiO_2 ($1°=12$ мг/л SiO_2); (SiO_2);

общее содержание диоксида углерода в воде после катионного обмена и, в тех случаях, где это существенно, после удаления диоксида углерода (CO_2);

объем воды V, обрабатываемой между двумя операциями регенерации, в $м^3$, включая расход воды на собственные нужды, если это необходимо;

часовой расход, $м^3$;

обменную емкость C ионообменной смолы, выраженную в мг-экв/л на 1 л смолы в плотном состоянии.

Сначала определяют объем анионнообменного аппарата.

Для слабоосно́вных ионообменных материалов объем вычисляют по формуле

$$V_a = \frac{V \cdot ССК}{C},$$

а для сильноосно́вных ионообменных материалов по формуле

$$V_a = \frac{V\,(ССК + CO_2 + SiO_2)}{C}.$$

Затем рассчитывают объем катионообменного аппарата с учетом добавочного объема воды αV_a, необходимого для промывки анионообменного аппарата (где α изменяется от 5 до 20 в зависимости от типа смолы)

$$V_c = \frac{(V + \alpha V_a)\,(\text{ССК} + \text{ОЩ})}{C}.$$

Вычисленные объемы сравнивают с часовым расходом воды, подаваемой на обработку. Существуют верхние пределы расходов или объемов загрузки. Если V_c или V_a слишком малы, то они должны быть откорректированы, возможно путем увеличения объема воды V, обрабатываемой за один цикл.

А. Принципиальные схемы обессоливания. Абсолютно полный обмен не может быть достигнут на упрощенных схемах, описанных выше, поскольку требуется определенный избыток реагентов для регенерации. С учетом этого для полного обессоливания разработано большое число различных схем.

Исследованы различные комбинации ионообменных аппаратов с целью либо увеличить степень деминерализации, либо снизить потребление регенерирующих реагентов.

Приняты следующие обозначения:

C_f — слабокислотный катионит;
CF — сильнокислотный катионит;
A_f — средне- или слабоосно́вные аниониты;
AF — сильноосно́вный анионит;
CO_2 — физически удаленная двуокись углерода;
L_m — смешанная загрузка.

Рассмотрим основные области применения каждой схемы и ее технологические параметры.

Б. Системы с одноступенчатым катионированием:

а) сильнокислотный катионит + слабоосно́вный анионит. Система состоит из аппарата с сильнокислотным катионитом, который регенерируется сильной кислотой. Этот аппарат работает последовательно с аппаратом, содержащим слабо- или среднеосно́вный анионит, регенерируемый каустической содой или аммиаком. Полученную воду используют либо без дальнейшей обработки, если содержание угольной кислоты не препятствует этому, либо обрабатывают на аппарате для удаления CO_2, расположенном до или после анионитового фильтра.

В этом случае обработанная вода содержит всего несколько мг/л диссоциированных солей, кроме кремниевой кислоты и, если она прошла дегазацию, несколько мг/л диоксида углерода. В соответствии с принятой скоростью регенерации катионита электрическая проводимость обработанной воды может составлять от 2 до 20 мкСм/см; pH в пределах 6—6,5, если диоксид углерода надлежащим образом удален;

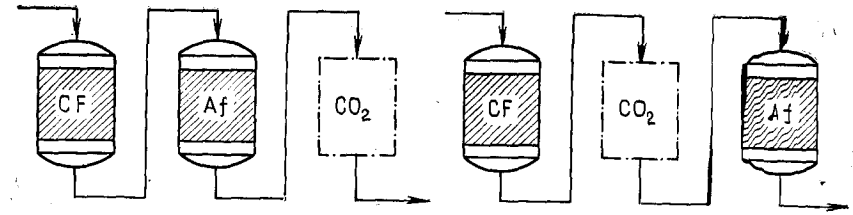


Рис. 10.7

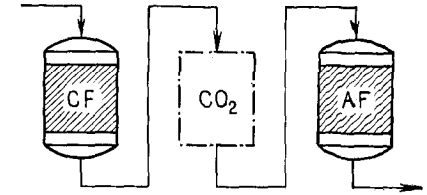


Рис. 10.8

б) сильнокислотный катионит+сильноосно́вный анионит; все ионы, включая кремний, удаляются из воды при ее прохождении последовательно через катионитовый фильтр и сильноосно́вный анионитовый аппарат. В большинстве случаев желательно снизить поток ионов, проходящих через анионитовый фильтр путем установки между анионитовым и катионитовым фильтрами ступени для удаления диоксида углерода до концентрации нескольких мг/л.

Качество деминерализованной воды в основном зависит от степени регенерации катионита. В очищенной воде могут присутствовать следы каустической соды (или извести, если сырая вода не содержит натрия) в количестве, соответствующем проскоку ионов на катионитовом фильтре. Снижение содержания кремния зависит от количества натрия, оставшегося в деминерализованной воде. Практически вода, полученная этим методом, имеет электрическую проводимость обычно от 3 до 20 мкСм/см; содержание кремния 0,05—0,5 мг/л и pH=7—9;

в) сильнокислотный катионит + слабоосно́вный анионит + сильноосно́вный анионит; эта комбинация — вариант одной из вышеприведенных схем. Она обеспечивает такое же качество обработанной воды, но имеет экономические преимущества, когда исходная вода содержит значительную долю анионов сильных кислот (хлоридов, сульфатов). В данной системе вода после сильнокислотного катионитового фильтра проходит последовательно через слабоосно́вный анионит и сильноосно́вный анионит. Аппарат для удаления CO_2, который не является обязательным, может быть установлен между катионитовым фильтром и первым анионитовым или между двумя анионитовыми фильтрами.

Анионитовые фильтры регенерируются последовательно раствором каустической соды, проходящей сначала через сильноосно́вный, а затем через слабоосно́вный анионит. Этот метод требует значительно меньше каустической соды, чем предыду-

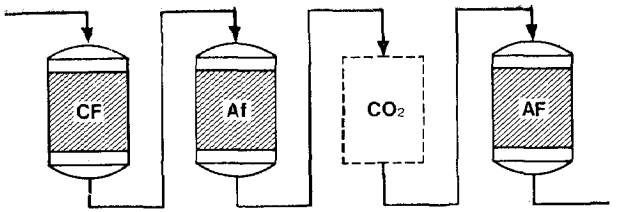


Рис. 10.9

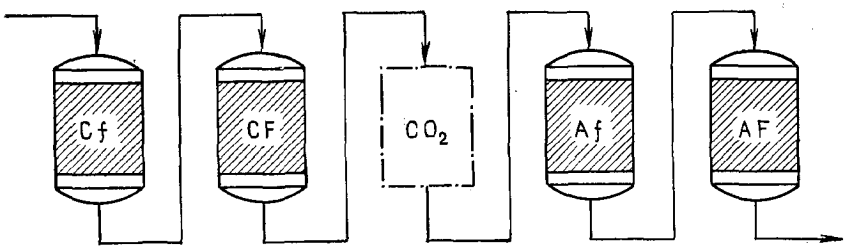


Рис. 10.10

щий, поскольку ее количества, оставшегося после нормальной регенерации сильноосно́вного анионита, достаточно для полной регенерации слабоосно́вного анионита;

г) слабокислотный катионит + сильнокислотный катионит, работающие последовательно; эта комбинация — новый вариант предыдущей схемы. Она имеет преимущества, когда исходная вода содержит большой процент бикарбонатов. В этой системе вода проходит последовательно через карбоксилированный, а затем через сульфированный ионообменные материалы.

Регенерация осуществляется последовательно сначала сульфированного, а затем карбоксилированного катионита. Поскольку регенерация карбоксилированного катионита протекает почти в соответствии со стехиометрией, количество остаточной серной кислоты после регенерации сульфированного катионита оказывается недостаточным и общая степень регенерации значительно снижается. На рис. 10.10 показана одна из возможных комбинаций ионообменников для такой схемы.

В. Системы с двухступенчатым катионированием. Как уже было отмечено, качество воды, полученной на установках, работающих по схемам, описанным выше, определяется проскоком ионов на первом катионитовом фильтре. В результате этого проскока, который изменяется в зависимости от состава исходной воды и степени регенерации, качество деминерализованной воды будет недостаточно хорошим, чтобы ее можно было ис-

пользовать, например, для питания паровых котлов высокого давления и иногда в химической, ядерной или электронной промышленности. Поэтому деминерализованная вода должна пройти дополнительную обработку. Проскок ионов обычно состоит исключительно из свободных оснований или щелочных бикарбонатов в зависимости от того, заканчивается ли первая ступень обработки сильноосно́вным или слабоосно́вным анионитом. Следовательно, если воду после первой ступени обработки пропустить через катионит второй ступени, степень удаления катионов окажется очень высокой и вода будет весьма чистой. На практике применяют большое число технологических схем с двухступенчатым катионированием.

Схема *а*:

- катионитовый фильтр первой ступени;
- аппарат для удаления CO_2, если это необходимо;
- слабо- или среднеосно́вный анионитовый фильтр;
- катионитовый фильтр второй ступени;
- сильноосно́вный анионитовый фильтр.

При такой схеме вода, покидающая катионитовый фильтр второй ступени, все еще содержит кремний и диоксид углерода, которые задерживаются на сильноосновном аниоките. Обработанная по этой схеме вода имеет очень низкую электрическую проводимость и содержание кремния в диапазоне 20—100 мкг/л.

Схема *б*:

- катионитовый фильтр первой ступени;
- деаэратор, если это необходимо;
- сильноосно́вный анионитовый фильтр;
- катионитовый фильтр второй ступени;
- сильноосно́вный анионит второй ступени.

При такой схеме вода, обработанная на катионитовом фильтре второй ступени, содержит только следы каустической соды. Анионитовый фильтр второй ступени несет очень небольшую нагрузку и вода получается превосходного качества (электрическая проводимость 0,05—1 мкСм/см, содержание кремния 5—20 мкг/л).

В одном из вариантов схемы, описанной выше, сильноосно́вный анионит первой ступени заменен комбинацией слабоосно́вного и сильноосно́вного анионитов, работающих последовательно. Способ получения воды по этой схеме ($CF — A_f — AF — CF — AF$) предпочтителен для питания котлов высокого давления и является исключительно надежным. Расход каустической соды очень низок, поскольку два анионитовых фильтра регенерируются последовательно. И, наконец, опыт показывает, что такая схема дает наилучшие результаты и создает наилучшие условия для работы ионообменных смол, когда в исходной воде содержатся органические вещества.

Другой вариант этой схемы ($C_f — CF — A_f — AF — CF — AF$) позволяет снизить расход кислоты на регенерацию по срав-

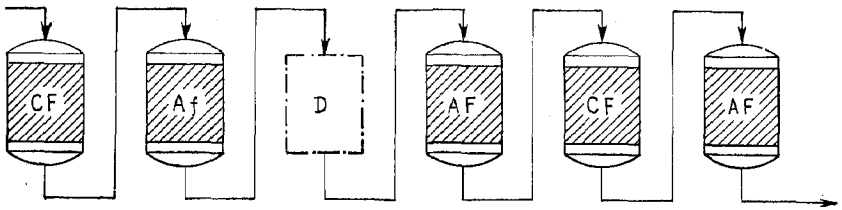


Рис. 10.11

нению с предыдущей схемой, когда исходная вода имеет высокое содержание бикарбонатов.

Вода, из которой удалены катионы и которая имеет слабокислую реакцию, может успешно применяться в некоторых процессах химической промышленности. В этих случаях используют следующую схему:

катионитовый фильтр первой ступени;

анионитовый фильтр с удалением диоксида углерода;

катионитовый фильтр второй ступени.

Вода, полученная по этой схеме, имеет очень низкий сухой остаток, почти не содержит катионов Na^+ и Ca^{2+}, имеет pH=6 до 7 и электрическую проводимость 1 мкмСм/см.

10.4.2. РЕГЕНЕРАЦИЯ ОБРАТНЫМ ПОТОКОМ. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТРАТИФИЦИРОВАННЫХ ЗАГРУЗОК

Давно известно, что нелогично пропускать регенерирующий реагент через загрузку ионообменных смол в том же направлении, что и обрабатываемую воду. Регенерационный раствор не может использоваться достаточно эффективно, если он последовательно проходит через слои ионообменного материала с убывающей степенью насыщенности (см. гл. 3, с. 96).

Однако различные трудности, связанные с проектированием и технологией ионного обмена, препятствовали внедрению противоточной регенерации.

Если регенерирующий раствор пропускается снизу вверх, то его следует вводить в нижнюю часть колонны; система для сбора этого раствора должна быть смонтирована выше верхнего слоя ионообменного материала. Совершенствование технологии дает возможность регулировать степень расширения загрузки из ионообменного материала и обеспечить распределение регенерирующего раствора с максимально возможной равномерностью. Способы осуществления такого процесса можно разделить на три категории: удержание загрузки инжектированием воды, механическим удержанием и с помощью инжектирования и отсоса воздуха.

10.4.2.1. Удержание загрузки инжектированием воды. Регенерационный раствор впускается в нижнюю часть загрузки ионообменного материала, в то время как в верхнюю часть колонны инжектируется вода. Обе жидкости удаляются в точках, расположенных в верхней части слоя загрузки.

Оценка цикла регенерации показала, что этот метод из-за нестабильности гидравлического режима не позволяет оптимально использовать регенерирующий раствор. Тем не менее результаты исследований свидетельствуют о заметном улучшении качества обработанной воды по сравнению с системой регенерации сверху вниз, особенно если используется пульсационная система регенерации и скорость восходящего потока ограничивается пределами 2—2,5 $м^3/(м^2 \cdot ч)$.

10.4.2.2. Механическое удержание загрузки. Для задержания фильтрующей загрузки могут применяться различные механические устройства, например резиновые или пластиковые диафрагмы, надуваемые во время регенерации, или инертные материалы для заполнения пустого пространства над поверхностью загрузки и т. д.

Если используют «плавающую загрузку», во время цикла фильтрования поток обрабатываемой жидкости движется снизу вверх, а во время регенерации раствор перемещается сверху вниз.

Эти процессы требуют дополнительного оборудования для задержания мелких фракций материала загрузки и взвешенных ве-

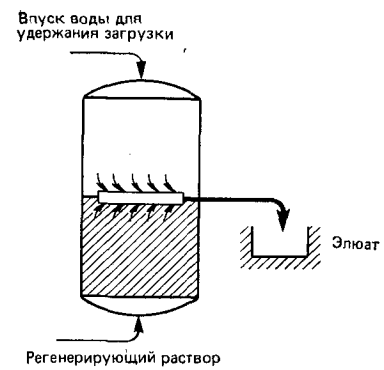


Рис. 10.12

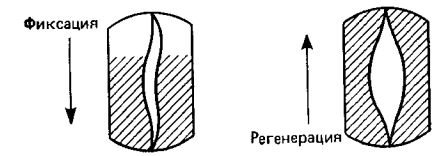


Рис. 10.13

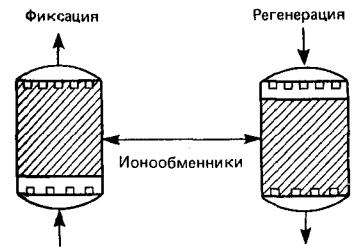


Рис. 10.14

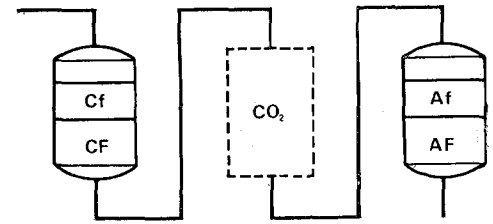


Рис. 10.15

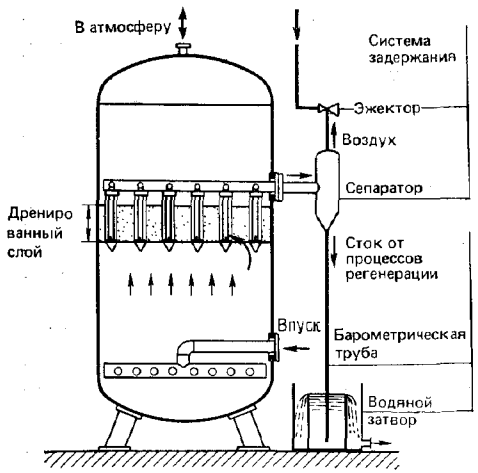


Рис. 10.16. Схема регенерации обратным потоком (загрузка удерживается отсосом воздуха)

ществ, приносимых с исходной водой и регенерирующими растворами.

10.4.2.3. Удержание загрузки с помощью инжектирования или отсоса воздуха. По этому методу слой ионообменного материала частично осушается, что удерживает его на месте в течение процесса регенерации. На первой стадии регенерации верхняя часть фильтра опорожняется до уровня, на котором расположен коллектор для элюата, вследствие чего верхняя часть слоя загрузки осушается. Воздух либо подают под давлением, либо отсасывают его вакуум-насосом в течение всего цикла подачи и удаления регенерационного раствора (см. рис. 10.16).

Таким образом, положение загрузки может быть стабилизировано и ее расширение предотвращено; при этом скорость инжектирования регенерирующего раствора может быть увеличена в несколько раз, т. е. до 10 $м^3/(м^2 \cdot ч)$. Такие высокие скорости имеют особые преимущества, если регенерация осуществляется серной кислотой.

10.4.2.4. Использование многослойных загрузок. Иногда можно комбинировать в одном сооружении сильные и слабые ионообменные материалы одной и той же полярности при условии, что они имеют различную плотность. В этих случаях разделение слоев осуществляется гидравлическим способом обратным потоком воды таким образом, что во время цикла фиксации обрабатываемая жидкость проходит последовательно через слабые ионообменники, а затем через сильные, в той же последовательности, как это было описано в предыдущих схемах.

Чтобы система работала с максимальной эффективностью, регенерирующий раствор, конечно, должен проходить через загрузку в направлении, противоположном движению обрабатываемой воды, т. е. снизу вверх.

Благодаря разработанным способам обеспечения эффективной регенерации в восходящем потоке стало возможным использование ионообменных фильтров с многослойными загрузками, рассмотренных ниже.

Разница плотностей карбоксилированных и сульфированных смол невелика, вследствие чего они разделяются менее

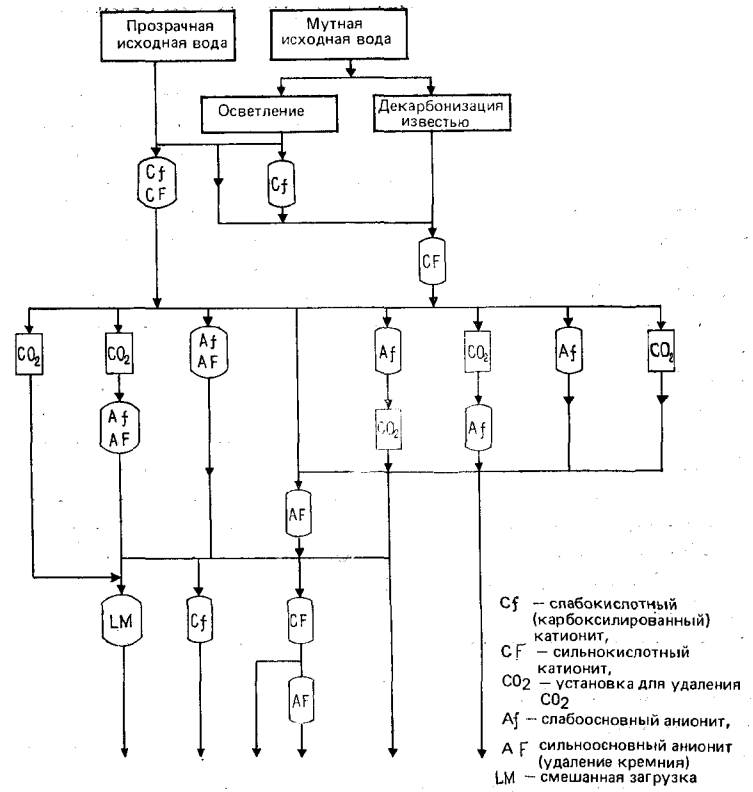


Рис. 10.17

эффективно, чем сильно- и среднеосновные аниониты. Поэтому многослойные загрузки из катионитовых ионообменных материалов применяют редко.

● *Работа ионообменных смол, регенерируемых обратным потоком.* Качество обработанной воды изменяется в зависимости от выбранной скорости регенерации ионообменных смол. Вода со средним содержанием кремния и различных солей после первичной обработки имеет электрическую проводимость в пределах 0,5—5 мкСм на 1 см при содержании кремния в основном менее 50 мкг/л. Такая вода после предварительной обработки может быть использована для питания котлов среднего давления без необходимости более глубокой доочистки этой воды на второй ступени на катионит-анионитовых смолах.

Если же требуется более чистая вода, то могут быть использованы системы, состоящие из нескольких катионообменных фильтров, работающих последовательно (рис. 10.17).

На установках глубокой очистки часто применяют технологию с использованием смешанных загрузок.

Эти установки существенно отличаются от установок с однослойными загрузками. Во-первых, анионитовые и катионитовые смолы используют в одном и том же корпусе. Обе смолы непосредственно смешивают сжатым воздухом. Таким образом, зерна различных смол находятся рядом и в целом такая загрузка работает как бесконечное число анионитовых и катионитовых установок, работающих последовательно. Чтобы осуществить регенерацию, две смолы разделяют гидравлическим путем в потоке воды. Поскольку аниониты легче, они поднимаются наверх, в то время как более тяжелый катионит опускается на дно.

Когда смолы разделены, каждая из них регенерируется отдельно: анионитовая часть — каустической содой, катионитовая — сильной кислотой. Некоторый избыток реагентов удаляют промывкой каждой части загрузки отдельно. После частичного опорожнения фильтра обе загрузки перемешивают сжатым воздухом. Промывка закончена, фильтр готов к работе.

Обессоливание на смешанных загрузках имеет следующие преимущества по сравнению с раздельными:

процесс обеспечивает получение воды очень высокой чистоты и ее качество остается постоянным в течение всего фильтроцикла;

значение pH воды близко к 7;

низкое потребление воды на промывку.

Недостатки этого метода состоят в том, что смешанная загрузка имеет меньшую обменную емкость и более сложна в эксплуатации из-за того, что необходимо тщательно перемешивать и разделять составные части загрузки.

Процесс со смешанными загрузками наиболее часто используют для глубокой доочистки после предварительного обессоливания или когда сырая вода содержит незначительное количество ионов, например при обессоливании конденсатов или воды замкнутых контуров ядерных установок.

В последнем случае сложная система ионообменных аппаратов может быть заменена одним аппаратом со смешанной загрузкой. Могут быть также использованы следующие специальные схемы:

катионитовый фильтр — установка для удаления CO_2 — фильтр со смешанной загрузкой;

установка умягчения — фильтр со смешанной загрузкой;

катионитовый фильтр — слабоосно́вный анионит — фильтр со смешанной загрузкой (преимущественно для воды с высоким содержанием анионов сильных кислот).

Если вода имеет высокое содержание кремния или удаление кремния должно быть максимально полным, может быть использована одна из следующих схем:

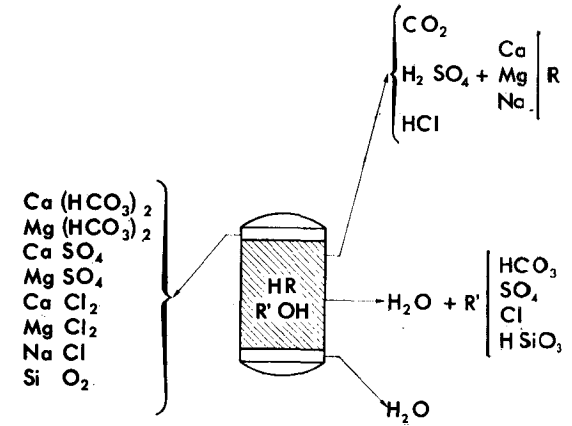


Рис. 10.18

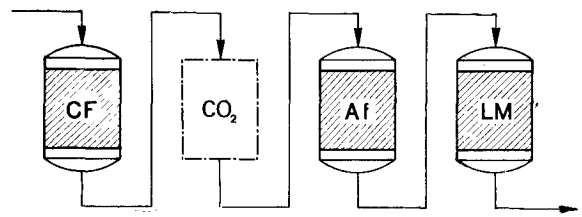
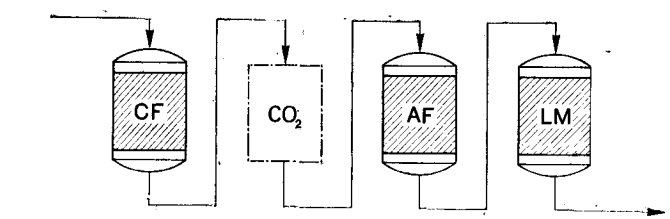


Рис. 10.19



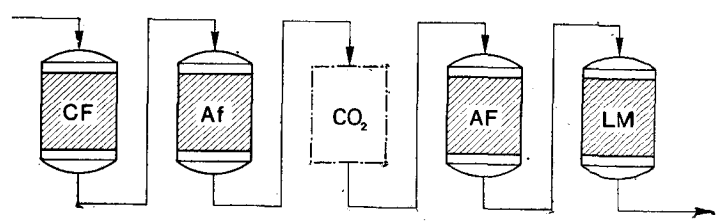


Рис. 10.20

10.4.4. ПРОЦЕССЫ ИОНООБМЕНА В ДВИЖУЩЕЙСЯ ЗАГРУЗКЕ

Во всех способах очистки воды от солей, описанных выше, применяют вертикальные аппараты, работающие циклично, с неподвижными слоями загрузки из ионообменных материалов. В таких аппаратах последовательно осуществляются процессы фиксирования ионов, расширения, регенерации и промывки загрузки, после чего ионообменный материал возвращается в свое первоначальное состояние и аппарат готов к проведению нового цикла.

Такие системы имеют некоторые недостатки:

- необходимую массу ионообменного материала рассчитывают не на основе часового расхода, а из условия автономности работы аппарата между двумя регенерациями, поэтому в случаях высокого солесодержания исходной воды требуются большие объемы ионообменных материалов;
- перерывы в подаче очищенной воды во время циклов регенерации; это означает, что либо оборудование очистной станции должно быть продублировано, либо должен быть предусмотрен резервуар очищенной воды значительной емкости для регулирования расхода;
- сложность операций регенерации;
- необходимость в больших дополнительных объемах аппаратов для расширения загрузки и большой расход промывной воды.

Кроме того, поскольку очень важно закончить фильтрование при появлении проскока ионов в нижней части загрузки, который происходит намного раньше полного насыщения всей смолы задерживаемыми ионами, эффективность работы ионообменного материала во время фиксации и регенерации намного ниже теоретически возможной.

Специалисты по ионному обмену давно занимаются изучением проблемы замены обычного метода непрерывным процессом с противоточной регенерацией. Трудности, которые при этом нужно преодолеть, состоят прежде всего в необходимости обеспечить:

- регулярную и управляемую циркуляцию ионнообменного материала;
- отделение истощенной смолы от обработанной жидкости;
- правильное распределение жидкости в движущемся слое ионообменного материала;
- использование метода циркуляции, который бы не оказывал сильного механического воздействия на ионообменный материал;
- наличие оборудования для контроля и регулирования.

Все эти трудности были преодолены при разработке непрерывного процесса ионного обмена (Е. С. I. Degremon). В данном издании представлен вариант установки для непрерывного процесса, улучшенной и упрощенной по сравнению с установками, описанными в предыдущих изданиях. Эта установка состоит из следующих элементов (рис. 10.21): ионообменной колонны F, оборудованной воронкой L для промывки и удаления тонких частиц; колонны для разделения исходной воды и ионнообменного материала (не обязательна), колонны регенерации R.

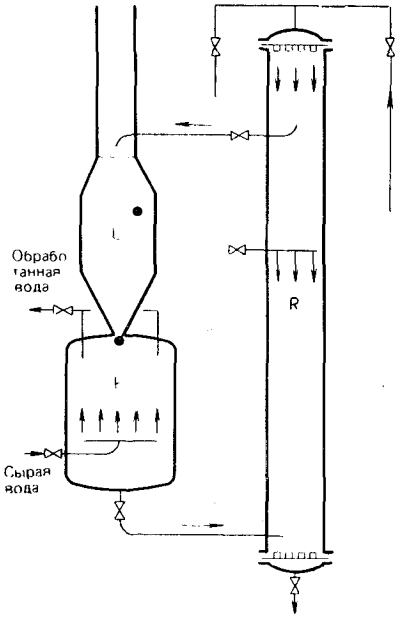


Рис. 10.21

Эти аппараты по конструкции в основном аналогичны аппаратам для проведения процесса с компактным слоем, однако ионообменная колонна или колонна регенерации могут быть специально сконструированы для работы с псевдоожиженным слоем, т. е. для обработки жидкостей с высоким содержанием взвешенных веществ. Ионообменная смола циркулирует полунепрерывно через запрограммированные интервалы времени, двигаясь от дна рабочей колонны регенерации и затем в промывную воронку, после чего инжектируется обратно в рабочую колонну. Поскольку все жидкости циркулируют в направлении, противоположном движению ионообменного материала, то аппараты (рабочая колонна, колонна регенерации, промывной аппарат) работают с оптимальной эффективностью, меньшим количеством ионообменных материалов; процесс регенерации протекает значительно эффективнее.

Заранее устанавливают расходы необработанной воды, регенерирующих реагентов, разбавляющей и промывной воды. Циркуляция смолы регулируется в соответствии с интервалами опорожнения дозирующего устройства в верхней части рабочей колонны. Если состав исходной воды изменяется, скорость инжекции регенерирующего раствора и циркуляции смолы соответствующим образом корректируется.

Схема, описанная выше, применима для одиночного ионообменного аппарата, который используют с целью умягчения (катионит регенерируется хлористым натрием) и удаления катионов (катионит регенерируется кислотой).

Если требуется деминерализация обычного типа, то могут быть скомбинированы две такие установки, каждая из которых включает три колонны, установленные последовательно. Одна колонна содержит катионит, регенерируемый кислотой, а дру-

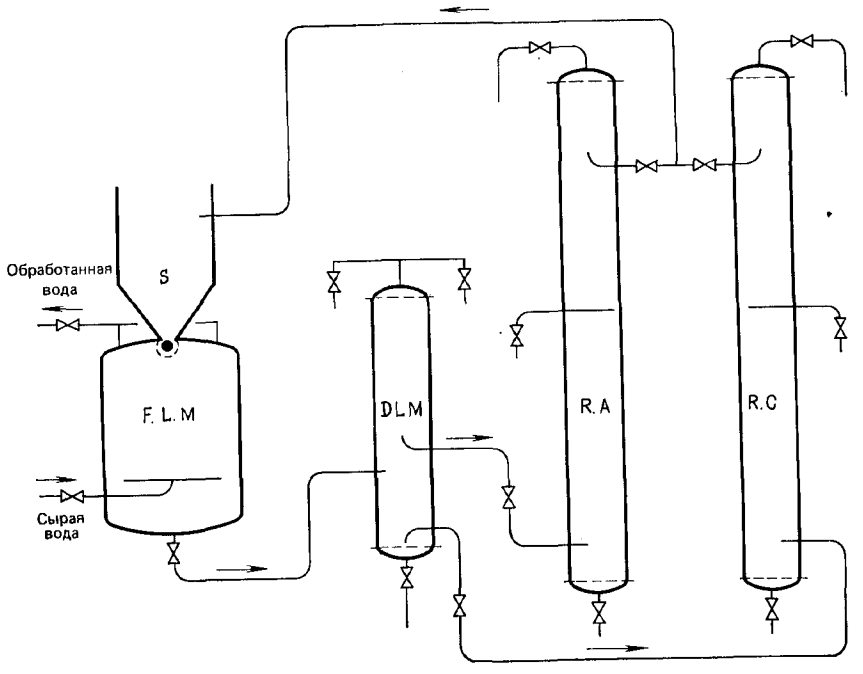


Рис. 10.22. Система непрерывного обессоливания со смешанной загрузкой
F. L. M — ионообменная (фиксирующая) колонна; D. L. M — колонна сепарации; R. A — колонна регенерации анионита; R. C — колонна регенерации катионита; S — накопитель

гая — анионит, регенерируемый каустической содой или аммиаком.

Качество получаемой воды определяется проскоком ионов из катионитовой колонны, который зависит от степени регенерации и солесодержания обрабатываемой воды. Если требуется получить очень чистую воду (электрическая проводимость менее 1 мкСм/см, содержание кремния менее 50 мкг/л), применяют установку с подвижной катионит-анионитовой смешанной загрузкой, схема и основные узлы которой приведены ниже.

Установка включает (рис. 10.22) рабочую колонну со смешанной загрузкой, колонну разделения смол; две колонны регенерации, одна из которых предназначена для регенерации катионита, другая — для анионита.

Для смешанной загрузки нет необходимости продолжать промывку до тех пор, пока будут удалены последние следы солей. В результате питающая воронка может быть установлена меньшего размера, чем воронка для промывки и удаления тонкой взвеси.

Назначение рабочей колонны — фиксация и освобождение ионов. Из нижней части рабочей колонны в колонну разделения

гидравлическим путем поступает смесь смол. Эта колонна предназначена для четкого разделения катионитов и анионитов: первые удаляются из нижней части, а вторые — на соответствующем уровне верхней части колонны.

Датчик уровня приводит в действие автоматический клапан, включающий или останавливающий подачу смолы в соответствии со скоростью поступления ее в колонну регенерации (описание ее работы приведено на с. 303).

Иониты после регенерации и промывки гидравлически транспортируются в смесительную воронку, из которой дозируются в рабочую колонну.

Скорость подачи смолы определяется очень просто: объем каждой загружаемой порции умножают на число опорожнений воронки в час.

Этот тип сооружений используют для обработки воды, которая не содержит слишком большого количества бикарбонатов, поскольку системы со смешанной загрузкой исключают возможность физического удаления CO_2 из карбонатов. В результате анионит будет фиксировать диоксид углерода, что увеличивает стоимость ионообменных смол и вызывает необоснованный перерасход реагентов.

Для обработки воды, содержащей бикарбонаты, наиболее экономичная схема, позволяющая получить воду высокой чистоты, включает установку непрерывной декарбонизации на отдельном однослойном фильтре из карбоксилированной смолы (см. с. 320) с последующим физическим удалением диоксида углерода и установку с подвижной смешанной загрузкой.

Последовательная регенерация сульфированной и карбоксилированной смол дает возможность экономить расход кислоты на регенерацию; система имеет промежуточный резервуар и позволяет осуществлять вторичное разбавление, если исходная вода богата кальцием и если желательно избежать слишком высоких концентраций солей кальция в воде, выходящей из колонны для регенерации карбоксилированной смолы.

В конечном итоге применение этого процесса позволяет снизить расход кислоты путем совместной регенерации, как это описано выше. Расход соды может быть снижен комбинированием физического удаления диоксида углерода и систематической противоточной регенерацией.

Применение непрерывных процессов в химической промышленности. При обработке жидкостей, которые необходимо вернуть в производство без разбавления (сахарный сироп, глюкоза, растворы, содержащие уран и другие химические растворы, подлежащие очистке), не допускается какое-либо заметное разбавление водой. Периодические процессы всегда сопровождаются значительным разбавлением, поскольку при переходе от извлечения к регенерации, и наоборот, всегда образуются зоны, где концентрации увеличиваются или снижаются и где

имеет место интенсивная промывка. При непрерывных процессах разбавление может быть во много раз снижено до пренебрежимо малых величин, если жидкость, несущая смолу, возвращается в специальную колонну. Эта колонна запроектирована таким образом, что в зоне отделения смолы от концентрированной жидкости возможно очень слабое разбавление небольшим количеством добавочной воды, которая вводится в цикл обработки.

Особые преимущества процесса EC1-Дегремон (непрерывный ионообмен). Уже говорилось о технических и технологических трудностях, которые пришлось преодолеть при разработке непрерывного процесса. По сравнению с другими этот процесс имеет следующие преимущества:

- смолы и жидкости всегда циркулируют в противоположных направлениях, поскольку регенерирующие растворы постоянно инжектируются в полностью уплотненную смолу;
- смола транспортируется гидравлическим путем и поэтому не подвергается сильному механическому воздействию;
- колонны фиксации, регенерации и промывки рассчитывают независимо друг от друга и подбирают индивидуально для каждого конкретного случая с учетом расхода, солесодержания и эффективности регенерации;
- конструкции оборудования для распределения и уплотнения должны быть разработаны с таким расчетом, чтобы уменьшить высоту единицы переноса до минимума, близкого к состоянию равновесия.

Другим преимуществом всех непрерывных процессов является то, что кислые и щелочные регенерационные элюаты поступают с постоянными и малыми скоростями и поэтому их намного легче нейтрализовать, чем в периодических процессах, так как не требуется строительства больших резервуаров для нейтрализации.

10.5. КОНТРОЛЬ И ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА

10.5.1. КОНТРОЛЬ РАБОТЫ ОБЕССОЛИВАЮЩИХ УСТАНОВОК

Работу обессоливающих установок необходимо тщательно контролировать. При этом наиболее существенное значение имеет определение следующих показателей:

электрической проводимости (обратная величина — электрическое сопротивление);
концентрации кремния;
жесткости (где это необходимо);
концентрации натрия;
значения pH.

Эти показатели можно определять в лаборатории: кремний по методу № 204 (с. 937); жесткость по методам № 302Б и 303Б (с. 941); натрий с помощью пламенной спектрофотометрии и значение pH электрометрическим методом.

Максимальная достоверность может быть получена только путем непрерывного автоматического контроля (см. гл. 19): электрическая проводимость (см. с. 576), кремний и жесткость (см. с. 583); pH (см. с. 579).

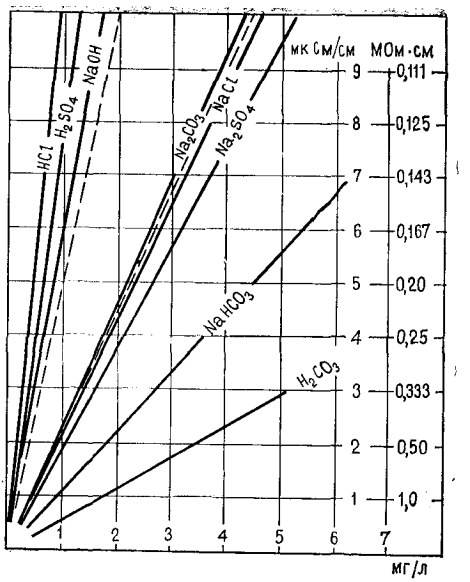


Рис. 10.23. Удельная электрическая проводимость некоторых электролитов при 20° С

Для правильной интерпретации результатов измерения электрической проводимости и последующих выводов о концентрации ионов в обработанной воде необходимо иметь в виду, что обычно обессоленная вода содержит только следы каустической соды, если последняя ступень установки, запроектированной надлежащим образом, представляет собой сильноосно́вный анионитовый фильтр, и следы бикарбоната или карбоната натрия, если она оканчивается слабоосно́вным анионитовым фильтром.

Соотношение между измеренной электрической проводимостью и проскоком ионов (мг/л) показано на рис. 10.23.

10.5.2. УДАЛЕНИЕ ОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ СМОЛАМИ-АДСОРБЕНТАМИ

Во всех приведенных рассуждениях принималось, что сырая вода содержит только минеральные вещества. В действительности все природные воды содержат в различных количествах органические вещества, которые в зависимости от их природы в различной степени реагируют с ионообменными материалами. Некоторые проходят через иониты без изменений, другие обратимо фиксируются смолой и удаляются при регенерации, в то время как третьи фиксируются необратимо и имеют тенденцию отравлять смолы. Последний недостаток особенно присущ сильноосно́вным анионитам; катиониты фактически не подвержены этому влиянию, слабоосно́вные аниониты фиксируют такие ве-

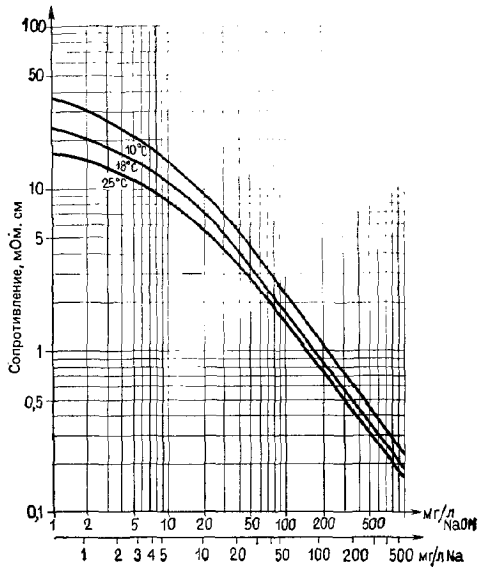


Рис. 10.24. Электрическое сопротивление воды как функция содержания соды

щества с той или иной степенью обратимости.

В большинстве случаев описанные выше системы дают в промышленных условиях удовлетворительные результаты, если ионообменные материалы подобраны правильно. Однако результаты, полученные на обычных схемах, не всегда удовлетворительны, особенно в случае, когда сырая вода содержит органические вещества гумусового происхождения. При очистке таких вод могут быть применены высокопористые и адсорбционные аниониты с целью доочистки в конце обычных схем или в начале для защиты ионообменных материалов. В последнем случае органические вещества фиксируются непосредственно смолой и затем удаляются обработкой хлористым натрием или каустической содой.

Для очистки поверхностных вод, конечно, желательно иметь перед обессоливающей установкой хорошо отлаженную систему предварительной очистки коагуляцией, осветлением и фильтрованием, которая часто позволяет снизить концентрацию растворенных и коллоидных органических веществ на 50—90%.

Прекрасные результаты получены для гуминовых кислот путем пропускания воды через тонкий порошкообразный активный уголь, используемый в виде намывного слоя в патронных фильтрах после обработки воды коагуляцией и фильтрованием.

10.5.3. ДЕЗИНФЕКЦИЯ ИОНООБМЕННЫХ МАТЕРИАЛОВ

При эксплуатации ионообменных установок иногда возникают осложнения, обусловленные присутствием микроорганизмов: загрузка забивается колониями микроорганизмов (особенно на карбоксилированных смолах), либо зарастают внутренние поры ионообменного материала (особенно на анионитах). Меры борьбы с этими явлениями, которые следует применять только после консультации со специалистами, могут быть двух типов:

предупредительные — непрерывное или периодическое хлорирование сырой воды;

восстановительные — дезинфекция самой загрузки формальдегидом или растворами веществ на основе четвертичных аминов.

11. АДСОРБЦИЯ И АДСОРБЕНТЫ

Определение термина «адсорбция» и характер влияния основных факторов на перенос органических веществ из раствора на поверхность адсорбента были рассмотрены в гл. 3 (с. 90). В этой главе описаны основные адсорбенты, среди которых наиболее широко распространенным является активный уголь, и приведены сведения о методах и области применения гранулированных и порошкообразных активных углей.

11.1. ОСНОВНЫЕ АДСОРБЕНТЫ

11.1.1. АКТИВНЫЙ УГОЛЬ

Как уже говорилось, удельная площадь поверхности — фактор, определяющий качество адсорбента. Чтобы обеспечить очень большую удельную поверхность (700—1500 м²/г) различных углеродных субстратов, можно использовать недорогие технологические процессы, например, химическую или термическую активацию. Вот почему активный уголь является наиболее широко распространенным адсорбентом при обработке воды в промышленности.

Обычные типы активных углей изготовляют из антрацита, битумного или мягкого угля, нефтяного угля, торфа, древесины и кокса. Опыт показывает, что активный уголь обладает широким спектром адсорбционной активности, поскольку большинство органических молекул задерживается на его поверхности.

Наиболее трудно сорбируются молекулы с короткой углеродной цепью (одноатомные спирты и низшие жирные кислоты, особенно те, молекулы которых состоят менее чем из трех атомов углерода) и некоторые полярные соединения. Молекулы с длинной углеродной цепью, ароматические соединения, замещенные углеводороды хорошо адсорбируются активным углем.

Очевидно, что молекулы, наиболее трудно сорбируемые, наоборот, легче разрушаются биологически. Это означает, что адсорбция комплементарна биологической обработке.

С учетом вышеизложенного, активный уголь используется в следующих случаях:

для окончательной доочистки очень чистых промышленных технологических растворов и питьевой воды, особенно если она

получена из поверхностного источника: активный уголь задерживает растворенные органические соединения, не разрушаемые естественным биологическим способом (самоочищение в водоемах): микрозагрязнения, вещества, определяющие вкус воды, некоторые тяжелые металлы (см. гл. 20, с. 670);

при «третичной» обработке городских и промышленных сточных вод. Уголь задерживает растворенные органические вещества, которые не разрушаются предшествующей биологической очисткой, тем самым снимая бо́льшую часть остаточной ХПК;

при обработке промышленных сточных вод, когда они не могут быть очищены биологическим методом или когда содержат токсичные органические соединения, исключающие применение биологических методов очистки. Использование активного угля часто позволяет селективно извлечь токсичные элементы, после чего сточная вода может обрабатываться биологическими методами.

Другим широко используемым свойством активного угля является его каталитическое воздействие, особенно на реакцию воды со свободным хлором: $Cl_2+H_2O\rightarrow 2HCl+{}^1/_2O_2$. Этот метод используется для дехлорирования воды, обработанной избыточными дозами хлора. Глубина фильтрующей загрузки, которая при данной скорости вызывает снижение количества хлора в обрабатываемой воде наполовину (см. гл. 27, с. 669) характеризует степень дехлорирующего воздействия угля. Величина pH существенно влияет на эту глубину. В зависимости от температуры, содержания в исходной воде свободного хлора и его допустимого остаточного содержания используются нагрузки от 5 до 15 объемов воды на 1 объем активного угля в час.

Тот же самый тип каталитического воздействия применяется для разрушения хлораминов до азота и азотной кислоты. Однако скорость реакции значительно меньше, чем для хлора (глубина полу-дехлорирования намного больше); поэтому объемная нагрузка должна быть намного снижена, если необходимо получить сравнимые результаты.

Дехлорирующая способность активного угля подвержена воздействию некоторых факторов, которые могут препятствовать контакту между углем и обрабатываемой водой. К ним относятся отложения карбоната кальция, поверхностное насыщение во время адсорбции различных загрязнений и т. д.

11.1.2. ДРУГИЕ АДСОРБЕНТЫ

Несмотря на наличие природных адсорбентов (о которых говорилось в гл. 3), последнее время были предприняты попытки создать новые адсорбенты: неорганические и органические.

Неорганические адсорбенты — активный оксид алюминия и другие неорганические оксиды — могут иметь очень большие удельные площади поверхности, но только немногие из них

сравнимы с активным углем, что делает их весьма специфическими адсорбентами.

Органические адсорбенты — макромолекулярные смолы с удельной площадью поверхности от 300 до 500 м²/г. Их адсорбционная способность низка по сравнению с активным углем. Однако эти смолы имеют лучшие кинетические характеристики (при нагрузках от 5 до 10 объемов воды на 1 объем смолы в 1 ч); их легче регенерировать благодаря низкой энергии связи.

Применение этих смол рекомендуется в некоторых случаях, например для защиты ионообменных систем в процессах очистки стоков от обработки поверхностей металлов, где присутствуют неионогенные детергенты, или для извлечения фенольных соединений с целью возврата их в производство.

Здесь следует также упомянуть так называемые «ск'евенджиз» — высокопористые анионитовые смолы, описанные в гл. 10. Однако эти смолы имеют меньшую удельную поверхность и их действие на полярные соединения(такие как гуминовые кислоты, анионоактивные детергенты) частично обусловлено ионным зарядом, что отличает их от других адсорбентов.

11.2. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АКТИВНОГО УГЛЯ

Поскольку активный уголь имеет наибольшее значение, мы ограничим наше описание только этим адсорбентом. Угли выпускаются двух типов: порошкообразный уголь и гранулированный.

11.2.1. ПОРОШКООБРАЗНЫЙ УГОЛЬ

Порошкообразный уголь представляет собой частицы с размерами от 10 до 50 мкм. Углевание в основном сочетают с процессом осветления, непрерывно добавляя в воду уголь вместе с флокулянтами. Уголь проникает в хлопья и затем извлекается из воды вместе с ними. Иногда рекомендуется извлекать его прямым фильтрованием, но лучше использовать осветлитель с рециркуляцией осадка («Турбоциркулятор») или, еще лучше, осветлитель со взвешенным слоем осадка («Пульсатор»). Эти осветлители значительно увеличивают время, в течение которого вода и активный уголь находятся в контакте, тем самым облегчая достижение равновесия. Используя пульсатор вместо обычного отстойника, можно достичь экономии угля на 15—20% при той же степени очистки.

Порошкообразный уголь может быть также использован и в качестве материала для намывного слоя патронных фильтров при окончательной доочистке очень чистых технологических стоков (в процессе обработки конденсатов, для очистки промывной воды в электронной промышленности).

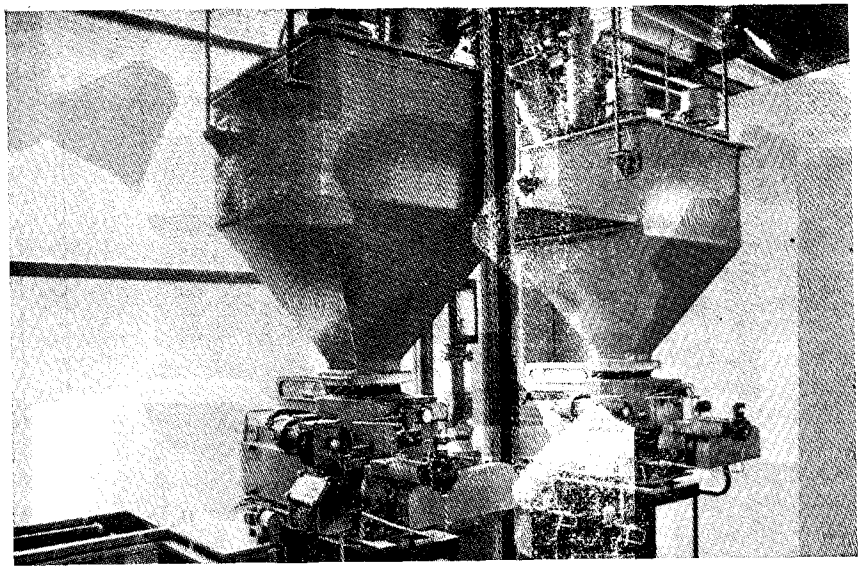


Рис. 11.1. Установка для дозирования и разбавления активного угля. Станция водоподготовки Орли. Водоснабжение Парижа

11.2.1.1. Преимущества применения порошкообразного активного угля заключаются в следующем:

- он в 2—3 раза дешевле гранулированного;
- для обработки воды в условиях пиковых нагрузок по загрязнениям могут быть использованы дополнительные количества порошкообразного угля;
- низкие капитальные затраты, если процесс обработки включает одну стадию флокуляция — осаждение (требуется всего лишь один дозатор для активного угля);
- адсорбция протекает быстро, поскольку активная поверхность угля легко доступна для загрязнений;
- активный уголь улучшает осаждение, так как хлопья становятся тяжелее.

11.2.1.2. Недостатки:

- порошкообразный активный уголь не может быть регенерирован, если он смешан с осадком гидроксидов, и его следует считать безвозвратно потерянным. Если уголь используется отдельно (без неорганических коагулянтов), то может быть применена современная технология регенерации в псевдоожиженном слое, но даже и она приводит к высоким потерям угля;
- для глубокой очистки необходимо добавлять большое избыточное количество активного угля.

Учитывая эти недостатки, порошкообразный уголь используют в основном в тех случаях, когда можно ограничиться средними или малыми дозами (менее 25—30 г/м³ в зависимости от конкретных условий).

11.2.2. ГРАНУЛИРОВАННЫЙ УГОЛЬ

11.2.2.1. Характеристики. Некоторые физико-механические характеристики нескольких типов гранулированных углей, применяемых при обработке воды, приведены в табл. 11.1. Как видно из данных табл. 11.1, характеристики этих углей существенно отличаются, что следует иметь в виду при выборе типа угля и оборудования для его использования (размер зерна, плотность, износоустойчивость).

ТАБЛИЦА 11.1

Исходный материал	Эффективный размер зерна, мм	Коэффициент неоднородности	Форма	Истираемость*, число ударов		Плотность (насыпная), кг/м³	Удельная поверхность, м²/г	Зольность, %
				740	1500			
A торф	0,95	1,5	Дробленый	31	54	0,29	650—750	4—6
B торф	0,66	1,4	Цилиндрический	22	38	0,42	1100—1200	5,5
C уголь	0,45	2,2	Дробленый	20	30	0,67	800—900	8
D уголь	0,6	1,6	Дробленый	11	23	0,45	1050—1200	8
E древесина	1,7	1,4	Дробленый	2,2	6,7	0,69	1000—1100	12
F нефтяной уголь	0,4	1,4	Сферический	25	45	0,58	1100—1300	0,2

* См. методику анализа № 502, с. 973.

11.2.2.2. Технология очистки фильтрованием через загрузку из гранулированного активного угля. Гранулированный уголь используют в качестве фильтрующей загрузки. Вода проходит через загрузку, оставляя загрязнения, которые затем систематически удаляют. Вода, постепенно освобождаясь от загрязнений, встречает на своем пути зоны, менее насыщенные загрязнениями и, следовательно, более активные.

Компактная загрузка из активного угля выполняет четыре функции: фильтра, биологической среды, катализатора и адсорбента.

Фильтр. Эта функция должна быть сведена до минимума, чтобы избежать забивания загрузки, которое неизбежно насту-

пает без эффективной системы предварительной очистки и приводит к необходимости полной перегрузки слоев угля после каждого цикла. Кроме того, уголь имеет тенденцию к преждевременному истощению, так как извлекает адсорбируемые продукты из хлопьев, с которыми он находится в контакте. Вот почему часто рекомендуется в качестве предварительной ступени использовать фильтрование через песчаную загрузку.

Биологическая среда. Поверхность гранулированного угля представляет собой идеальные условия для роста бактерий. Это явление может помогать очистке, однако может и очень затруднить ее, если биологические процессы в загрузке не контролируются надлежащим образом (анаэробное брожение вызывает появление запахов, забивание загрузки и т. д.).

Катализатор: см. гл. 11, с. 346.

Адсорбент: адсорбция остается основной функцией активного угля. Необходимо поддерживать хороший контакт воды с углем и предусматривать противоточные системы, когда адсорбционная емкость угля является определяющим фактором экономики процесса. Существует два возможных варианта осуществления адсорбции: на подвижной загрузке и неподвижном слое адсорбента.

Подвижная загрузка обеспечивает возможность проведения процесса в условиях противотока воды и активного угля. Основанием компактной загрузки может служить псевдоожиженный слой, что, между прочим, облегчает вывод активного угля на регенерацию (рис. 11.2).

Неподвижная загрузка. Применяют 2—3 колонны, работающие последовательно, таким образом, что первую колонну (без снижения общей эффективности работы системы) можно периодически отключать для промывки и подвергать регенерации только наиболее насыщенный уголь (в первой колонне). Таким образом, противоточная система может быть организована путем изменения последовательности работы колонн с 1, 2, 3 на 2, 3, 1 (после регенерации) и т. д.

Технология, которую применяют в этом случае, такая же, как и для песчаных фильтров. При этом особое внимание должно быть уделено системам промывки, чтобы избежать потери всплывающего активного угля с промывной водой.

11.2.2.3. Адсорбционная емкость угля. Ответ на вопрос: будет ли обработка активным углем экономична или нет, — в значительной степени зависит от его адсорбционной емкости, выражаемой в граммах снятой ХПК на 1 кг активного угля, что характеризует потребность в угле для получения заданного результата. Для данной системы, содержащей загрязненную воду и активный уголь, эта емкость зависит от глубины слоя загрузки и скорости обмена.

Глубина слоя загрузки. Чем больше глубина слоя загрузки, тем легче протекает адсорбция и не наблюдается чрезмерного

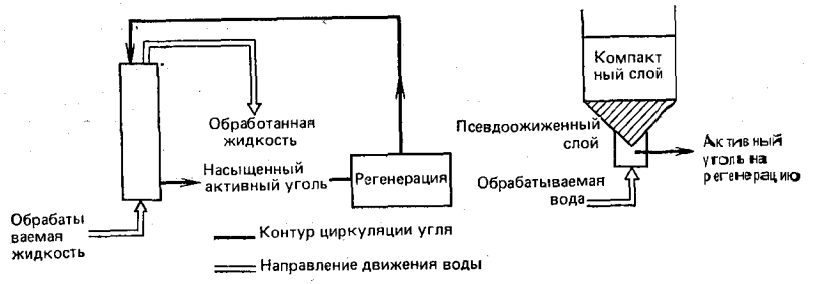


Рис. 11.2

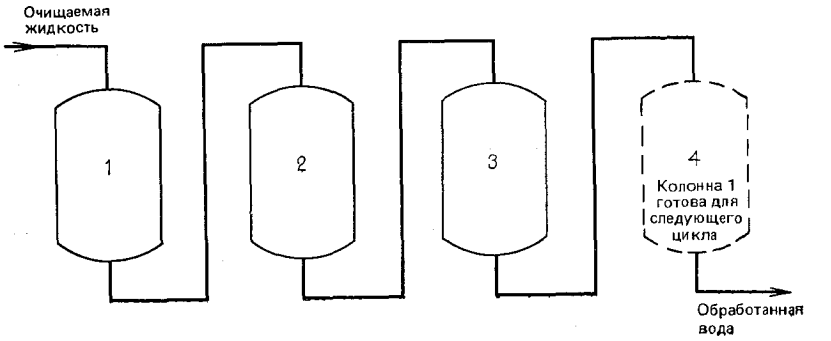


Рис. 11.3

проскока (принцип, аналогичный наблюдаемому при ионообмене, описан в гл. 3 на с. 93); в то же время обеспечивает полное насыщение верхнего слоя.

Скорость обмена. Эксперименты показывают, что 3 объема воды на 1 объем угля в час редко могут быть превышены при обработке воды с высоким содержанием загрязнений. В процессе обработки питьевой воды, в которой содержание адсорбируемых продуктов очень низкое, любое решение в отношении выбора оптимального варианта должно учитывать высокую строительную стоимость в результате того, что при использовании более высоких скоростей (5—10 объемов на объем в час) следует принимать неполное насыщение угля.

Теоретические положения дают лишь приближенное представление о закономерностях адсорбции. Поэтому все еще приходится прибегать к экспериментам и проводить динамические испытания на колоннах с размерами, достаточными, чтобы результаты могли быть экстраполированы на натурные сооружения.

11.2.2.4. Регенерация. Активный уголь подобно искусственным адсорбентам является дорогостоящим продуктом. В большинстве случаев простая замена насыщенного активного угля экономически не целесообразна. Поэтому уголь должен быть

регенерирован. Для этой цели разработаны три метода: регенерация паром, термическая и химическая регенерация.

Регенерация паром. Применение этого метода ограничено регенерацией углей, использованных для адсорбции легко летучих продуктов. Обработка паром может также предотвращать забивание поверхности зерен и способствовать дезинфекции.

Термическая регенерация осуществляется посредством пиролиза, сжигания адсорбированных органических веществ. Чтобы избежать выгорания угля, его нагревают до температуры 800 °С в контролируемой атмосфере. Это наиболее широко используемый метод, который обеспечивает хорошую регенерацию. Но он имеет два недостатка:

во-первых, требует значительных капитальных затрат на устройство многоподовых печей, печей с псевдоожиженным слоем или вращающихся печей. Печь должна быть оборудована системой автоматического управления составом газов, температурой, системой обезвоживания угля на входе и системой его охлаждения на выходе;

во-вторых, вызывает большие потери угля (7—10% за каждый цикл), так что после каждых 10—14 циклов первоначальный объем угля будет практически полностью заменен.

Химическая регенерация. Фирма «Дегремон» разработала технологию, основанную на действии растворителя, используемого при температуре около 100 °С и при высоких значениях pH. Преимущество этой технологии состоит в том, что при тех же капитальных затратах потери активного угля минимальны (около 1% обрабатываемого количества).

Однако использование химических реагентов для регенерации (щелочных реагентов и растворителей) приводит к образованию элюатов, из которых необходимо извлекать растворитель путем дистилляции. Затем загрязнения разрушаются сжиганием, если они не могут быть возвращены в производство.

Этот метод используется реже, чем термическая регенерация.

Биологическая регенерация не применяется в промышленном масштабе.

11.2.3. СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОРОШКООБРАЗНОГО И ГРАНУЛИРОВАННОГО УГЛЕЙ

Для обработки поверхностных вод с переменным уровнем загрязнений можно рекомендовать совместное применение порошкообразного угля в процессе осветления, чтобы снять пиковые нагрузки по загрязнениям, и гранулированного угля для адсорбции при нормальной степени загрязнения.

11.2.4. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Как отмечалось выше (см. с. 345), целесообразность применения активного угля должна рассматриваться каждый раз, когда необходимо удалить растворенные органические вещества, например детергенты, синтетические растворимые красители, хлорированные растворители, фенолы и гидроксильные производные, вещества ароматического ряда, замещенные или не замещенные, особенно хлорпроизводные и нитрованные продукты, а также вещества, придающие привкус и запах.

12. МЕМБРАННАЯ СЕПАРАЦИЯ

Рассмотрим три метода мембранной сепарации, которые рекомендуется использовать при обработке воды: обратный осмос, ультрафильтрацию и электродиализ.

Физические явления, лежащие в основе этих процессов и наиболее важные характеристики полупроницаемых мембран описаны в гл. 3, с. 86. Технологический режим работы мембран и область их применения рассмотрены ниже. Поскольку эти мембраны недавно появились на мировом рынке, то подобно всему новому, они все еще находятся на стадии усовершенствования, что в перспективе позволит открыть многочисленные новые области применения и снизить их стоимость.

12.1. ОБРАТНЫЙ ОСМОС

12.1.1. ОСМОС И ОБРАТНЫЙ ОСМОС

Понятие «обратный осмос» показывает обратимость процесса прямого или естественного осмоса.

В камере *А* содержится водный раствор неорганических солей, а в камере *Б* чистая вода (рис. 12.1). При естественном осмосе чистая вода проходит из камеры *Б* в камеру *А*. Уровень воды в камере *А* поднимается до тех пор, пока давление, создаваемое столбом жидкости, уравновесит поток чистой воды. При этом достигается осмотическое равновесие, и, как отмечалось в гл. 3, величина этого гидростатического давления называется осмотическим давлением раствора в камере *А*.

Если приложить к раствору соли гидростатическое давление, превышающее осмотическое (см. рис. 12.3), то обнаружим, что чистая вода протекает в направлении, противоположном описанному выше, и что соли задерживаются мембраной. Это явление стало известно как обратный осмос.

Обратный осмос становится возможным при использовании полупроницаемых мембран, которые свободно пропускают воду,

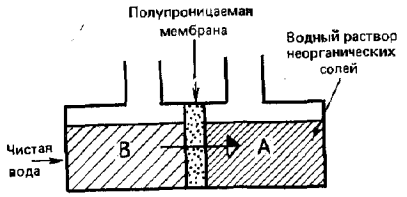


Рис. 12.1. Прямой осмос

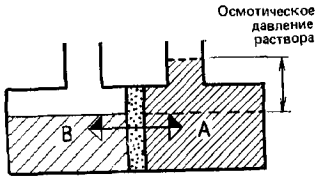


Рис. 12.2. Осмотическое равновесие

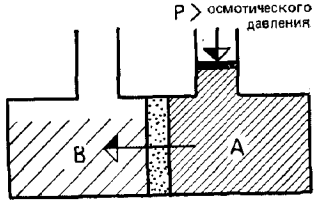


Рис. 12.3. Обратный осмос

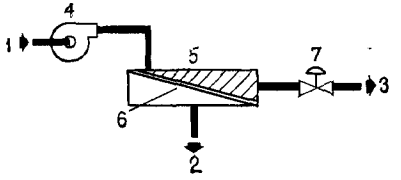


Рис. 12.4. Упрощенная схема процесса обратного осмоса

1 — сырая вода; *2* — очищенная вода (фильтрат); *3* — концентрат (сбросная вода); *4* — насос высокого давления; *5* — модуль обратного осмоса; *6* — полупроницаемая мембрана; *7* — выпускной клапан

и в то же время задерживают 90—99% всех растворенных неорганических соединений, 95—99% органических веществ и 100% мельчайших коллоидных примесей (бактерии, вирусы, коллоидная кремниевая кислота и т. д.).

Примечание. Эффективность мембраны при удалении солей, как установлено, изменяется от 90 до 99%. Иными словами, их солепроницаемость составляет 10—1%.

Мембраны являются основной частью мембранных элементов, называемых модулями. Простейшая система, применяемая на практике, состоит из насоса высокого давления и модуля, соединенных последовательно. Чистая вода проходит через мембрану под давлением, в то время как концентрат непрерывно удаляется через управляемый клапан (рис. 12.4). Отношение расхода очищенной воды к расходу воды, поданной на установку, называется коэффициентом выхода фильтрата *У* и выражается в процентах.

ТАБЛИЦА 12.1

Соль	Концентрация, мг/л	Осмотическое давление, кПа
NaCl	35 000	2786
NaCl	1000	79
Na_2SO_4	1000	42
$MgSO_4$	1000	25
$CaCl_2$	1000	58
$NaHCO_3$	1000	89
$MgCl_2$	1000	67

Как уже говорилось (см. гл. 3, с. 88), скорость переноса воды через мембрану в процессе обратного осмоса прямо пропорциональна эффективному давлению (т. е. разности между приложенным давлением и осмотическим). Известно, что концентрация в отдельном модуле изменяется в пределах от концентрации на входе $C_в$ до максимальной концентрации $C_т$ ψ (где $C_т$ — концентрация солей в концентрате; ψ — коэффициент поляризации). Поэтому чтобы получить удовлетворительную скорость фильтрования, желательно приложить давление, намного превосходящее осмотическое давление концентрата (см. табл. 12.1).

Практически используемые давления изменяются от 2,5 до 8 МПа (по крайней мере для больших установок).

12.1.2. ОБРАТНООСМОТИЧЕСКИЕ МЕМБРАНЫ

Когда мембраны изготовляют в лаборатории, их делают плоскими и мало внимания уделяют выбору материала. Но когда речь идет о промышленном применении, экономическая эффективность метода, определяемая в значительной степени конфигурацией мембраны и стабильностью выбранного материала, приобретает первостепенное значение.

В настоящее время на рынке имеются мембраны двух основных типов, изготовляемые из ацетилцеллюлозы (смесь моно-, ди- и триацетата) и из ароматических полиамидов.

Для ацетилцеллюлозных мембран характерна высокая удельная производительность. По форме эти мембраны подразделяются на трубчатые, листовые (спирально свернутые) и выполненные в виде полых волокон.

Полиамидные мембраны имеют более низкую удельную производительность. Их выпускают в виде полых волокон, что позволяет обеспечить максимальную площадь поверхности на единицу объема, которая примерно в 15 раз больше, чем у элементов из спирально свернутых листов (см. рис. 12.5 и 12.6).

Важно отметить, что полиамидные мембраны очень устойчивы к воздействию химических и биологических факторов, что обеспечивает бóльшую долговечность их по сравнению с ацетилцеллюлозными мембранами, гидролиз которых неизбежен, хотя и может быть сведен к минимуму, если строго контролировать значение pH и температуру.

Характеристики двух типов мембран, применяемых для обработки воды с солесодержанием менее 15 г/л, приведены в табл. 12.2.

Имеются также мембраны, предназначенные специально для обработки морской воды. Изготовленные из тех же полимеров, они имеют более плотную структуру, которая позволяет им обессоливать в одну стадию растворы, подобные морской воде, которые содержат несколько десятков граммов солей в 1 л. С 1975 года применение полиамидных мембран из полых волокон типа B-10 послужило основой для создания нескольких установок по обессоливанию морской воды, в особенности для использования на судах.

ТАБЛИЦА 12.2

Физико-химические характеристики	Мембраны из ароматического полиамида В-9, в виде полых волокон	Мембраны из ацетилцеллюлозы, спирально-навитые или в виде полых волокон
Давление, МПа:		
нормальное рабочее	2,8	3,0—4,2
максимальное обратное обработанной воды	0,35	—
Максимальная температура, °С:		
рабочая	35	30
хранения	40	30
Допустимое значение pH	4—11	4,5—6,5
Подверженность гидролизу	Не подвержена	Очень чувствительна
Степень воздействия бактерий	Не подвержена	Очень чувствительна
Содержание свободного хлора, мг/л:		
максимально допустимое при pH≤0,8	0,1	0,5—1
непрерывная доза при pH≤8	0,25	0,5—1
Степень воздействия других окислителей	Очень чувствительна	Средне чувствительна
Срок службы, лет	3—5	2—3
Солепроницаемость, %	5—10	5—10

12.1.2.1. Спирально навитые модули (рис. 12.5). В этой конструкции две мембраны навиваются на центральную трубу, по которой отводится фильтрат. Раствор, подлежащий деминерализации, протекает параллельно центральной трубе через щель, образованную прокладкой (обычно из пластмассовых сеток) между двумя активными поверхностями мембран. Фильтрат собирается внутри пористого материала и по нему движется к центральной трубе.

Используя плоские мембраны и эту технологию, можно конструировать модули, которые являются намного более компактными, чем те, которые появились на рынке впервые (т. е. плоские мембраны, покрытые пористыми слоями или мембраны, поддерживаемые трубами).

12.1.2.2. Модули из полых волокон, например Пермасеп В-9* (рис. 12.6). Полые волокна могут быть соединены в толстостенный пористый цилиндр, прочность которого зависит от соотношения наружного и внутреннего диаметров. При условии, что это соотношение остается постоянным по мере того, как оба диаметра увеличиваются, механическая прочность цилиндра будет постоянна, вопреки снижению толщины стенок, что увеличивает расход воды, проходящей через стенку. Благодаря этому имеется возможность создать мембрану с максимальной площадью поверхности на единицу объема, которая в то же время способна противостоять высоким давлениям без механического усиления.

Полые волокна типа В-9 имеют наружный диаметр 85 мкм при внутреннем диаметре 42 мкм. Из 21 мкм толщины стенок только наружный слой (около 0,1 мкм) более компактной

* Зарегистрированы под фирменной маркой Дю Пон де Немур.

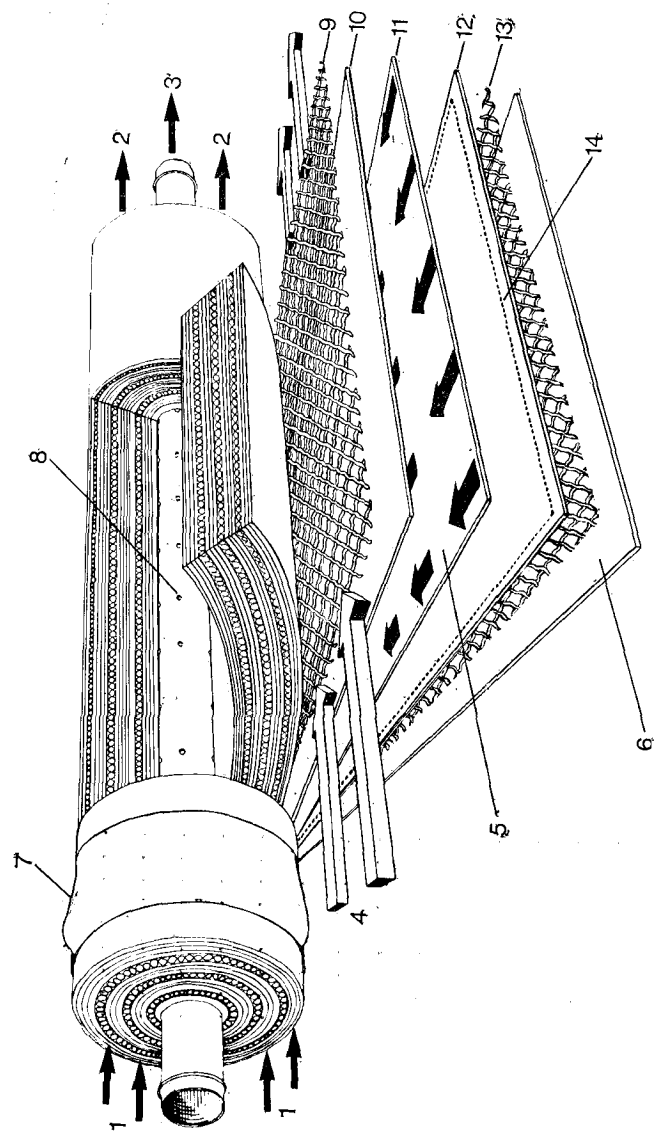


Рис. 12.5. Спирально навитой модуль

1 — сырая вода; *2* — концентрат; *3* — выход фильтрата; *4* — направление потока сырой воды; *5* — направление потока концентрата; *6* — защитное покрытие; *7* — стык между модулем и оболочкой; *8* — перфорированная труба для сбора фильтрата; *9* — прокладка; *10* — мембрана; *11* — коллектор из пористого материала для сбора фильтрата; *12* — мембрана; *13* — прокладка; *14* — линия шва, соединяющего две мембраны

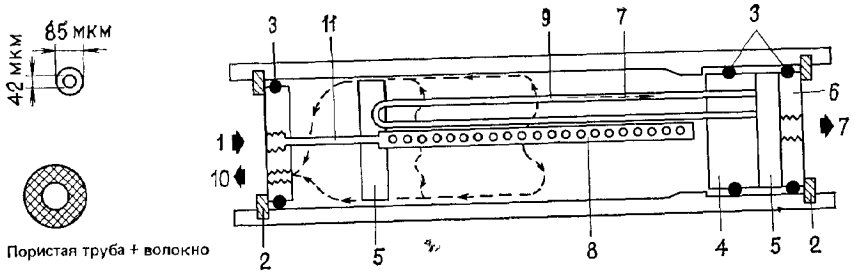


Рис. 12.6. Схема модуля В-9

1 — подача сырой воды; *2* — упорная шайба; *3* — кольцевой уплотнитель; *4* — замок из эпоксидной смолы; *5* — пористый диск; *6* — торцовая пластина; *7* — очищенная вода (фильтрат); *8* — пористая распределительная труба; *9* — полые волокна В-9; *10* — концентрат; *11* — непористая труба

структуры обеспечивает селективное действие. Мембраны этого типа называются асимметричными. Волокна способны выдерживать рабочее давление до 2,8 МПа без повреждения. Их собирают в модули по схеме, показанной на рис. 12.6. Несколько сотен тысяч волокон, сложенных в виде буквы *U*, монтируют внутри напорного резервуара из стекловолокна. Сырая вода под давлением распределяется радиально внутри модуля с помощью пористого или перфорированного коллектора, проходящего по всей длине модуля.

Под действием давления снаружи волокон чистая вода поступает сквозь стенки волокон в центральный канал, по которому она проходит через непроницаемую пластину из эпоксидной смолы, где закреплены свободные концы волокон. Затем вода собирается пористым диском и выводится из модуля. Концентрат собирается в пространстве между наружными поверхностями волокон и выводится через отверстие, расположенное с той же стороны модуля, где и впуск сырой воды. Модули этого типа выпускаются в большом ассортименте (различных типоразмеров и производительности).

Характеристика модулей типа «Пермасеп» В-9 0840

Длина, м	1,2
Диаметр, см	25
Производительность*, м³/сут	53
Солепропускание*, %	10
Давление, МПа:	
максимальное рабочее	2,8
допустимое обратное	0,35
Пределы pH	4—11
Максимальная рабочая температура, °С	35

* Производительность и солепроницаемость измерены при температуре 25 °С, на растворе хлористого натрия с концентрацией 1500 мг/л, при давлении 2,8 МПа и коэффициенте выхода фильтрата 75%.

Здесь приведены основные характеристики наиболее распространенного модуля. Обращает на себя внимание высокая производительность модуля 53 м³/сут при относительно небольшом его объеме 60 дм³.

12.1.3. ОБРАТНООСМОТИЧЕСКИЕ УСТАНОВКИ

Независимо от того, какая применена технология предварительной или последующей обработки, обратноосмотические установки состоят из большого числа элементарных модулей, которые соединяют в батареи по определенной схеме. По этой причине их можно легко расширить до требуемых размеров. Собственно этим объясняется то обстоятельство, что за несколько лет осуществлен переход от пилотных установок с производительностью несколько кубических метров в час к промышленным установкам с производительностью порядка нескольких тысяч кубических метров в сутки (например, установки «Менфуа» и «Сальбук» в г. Эр-Рияд в Саудовской Аравии с производительностью соответственно 38 500 и 46 000 м³/сут).

В простейшем варианте модули собирают по параллельной схеме. В этом случае все они работают в одинаковых условиях: при одном и том же давлении и коэффициенте выхода фильтрата. Такая система пригодна для большинства установок низкой производительности (см. рис. 12.7). Фильтры патронного типа защищают как насос высокого давления, так и мембраны от загрязнения взвешенными веществами. Два манометра, расположенные на входе и на выходе установки, обеспечивают возможность непрерывного измерения и регулирования потерь напора в системе. Два расходомера, измеряющие соответственно расходы обрабатываемой воды и концентрата, показывают коэффициент выхода фильтрата, который регулируется двумя клапанами, показанными на рис. 12.7.

Часто применяют и другие схемы установок. Например, чтобы увеличить коэффициент выхода фильтрата, может быть использовано последовательное соединение модулей (рис. 12.8). Раствор концентрата из первой ступени служит исходной водой для второй ступени. Промежуточного насоса не требуется, поскольку давление на выходе из первой ступени незначительно отличается от давления на впуске во вторую ступень (потери напора составляют 0,2—0,3 МПа). Системы такого типа обычно называют «ступенчатый концентрат». Они способны обеспечивать коэффициент выхода фильтрата 70—90% (для двух- или трехступенчатых установок) без заметного увеличения коэффициента поляризации.

В других случаях, например для производства ультрачистой воды, может быть использована двухступенчатая обработка воды («ступенчатый продукт»). Очищенная вода с первой ступени подается насосом на вторую ступень, где процесс очистки по-

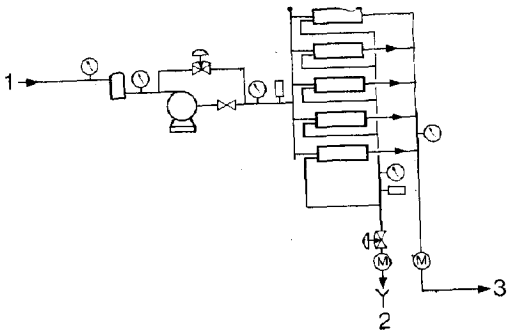


Рис. 12.7. Параллельное соединение:
1 — сырая вода; *2* — концентрат в коллектор; *3* — очищенная вода

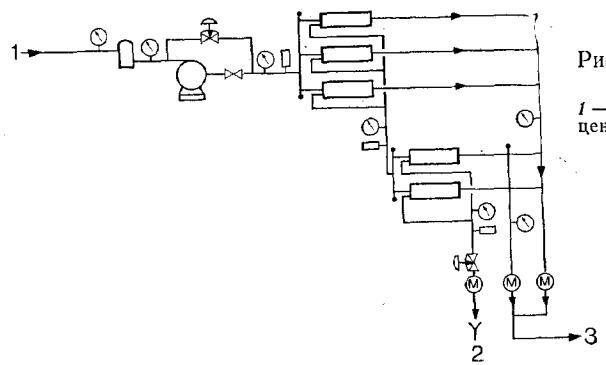


Рис. 12.8. Соединение по ступенчатой схеме:
1 — сырая вода; *2* — концентрат в коллектор; *3* — очищенная вода

вторяется. Концентрат со второй ступени с низкой концентрацией рециркулирует в начало установки для разбавления исходной воды.

Для осуществления обратного осмоса в стандартных условиях фирма «Дегремон» разработала установку-моноблок «Осмопак», которая включает от 3 до 30 модулей (ОР 3 — ОР 30), (рис. 12.9).

Условия работы установок. При обработке воды обратным осмосом происходит концентрирование примесей. Поэтому необходимо избегать осаждения любых растворенных веществ, содержащихся в концентрате, иначе в системе может быстро образоваться накипь. Содержание веществ в концентрате непосредственно связано с выбранным коэффициентом выхода фильтрата Y. Следовательно, если пренебречь содержанием солей, прошедших через мембрану, содержание веществ в концентрате C_r будет

$$C_r = 100C_e/(100 - Y),$$

где C_e — концентрация в исходной воде.

Поэтому если $Y = 75\%$, то $C_r = 4\,C_e$.

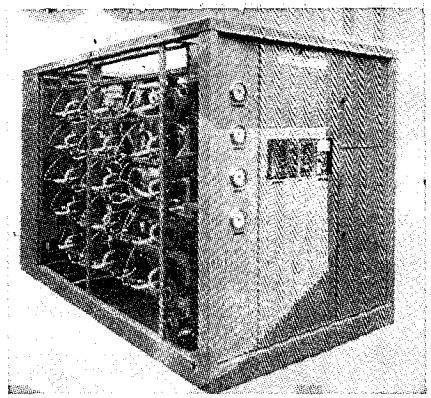


Рис. 12.9. Установка обратного осмоса Моноблок ОР 30

Если необходимо получить коэффициент выхода фильтрата более 20—30%, то в большинстве случаев сырую воду подвергают предварительной обработке. Оптимальное значение коэффициента выхода фильтрата может быть определено на основе комплексного анализа сырой воды (чем выше значение Y, тем более интенсивной должна быть предварительная обработка воды, но тем меньше энергии будет потребляться на получение 1 м^3 обработанной воды).

Такая предварительная обработка предусматривается с целью устранить или связать анионы или катионы соединений, которые могут выпадать в осадок. Имея это в виду, проблему можно решать одним из многочисленных методов: подкислением, удалением кремния, железа и др.

Все взвешенные частицы, задерживаемые обратноосмотическими мембранами, могут оседать на их поверхности, если коэффициент выхода фильтрата становится слишком большим в результате неадекватной промывки мембран. Оптимальные значения коэффициента выхода фильтрата можно определить тестом, измеряя индекс загрязненности (см. анализы 712 Е, гл. 27). Если вода содержит слишком много коллоидных частиц, необходимо предусматривать осветление и фильтрование для защиты мембран от быстрого забивания. Во всяком случае, нужно обеспечить периодическую очистку мембран от следов отложившихся веществ. В этих условиях преимущества химически стабильных мембран становятся особенно очевидными, поскольку они дают возможность применять большой ассортимент очищающих растворов в зависимости от характера загрязнений, содержащихся в воде.

12.1.4. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ОБРАТНОГО ОСМОСА

Обратный осмос применим во всех случаях, когда необходимо обессолить воду либо осуществить концентрирование ионов или органических молекул. В настоящее время этот метод наиболее широко используется для опреснения солоноватых вод и получения ультрачистой воды.

12.1.4.1. Снабжение питьевой и технологической водой потребителей, водные ресурсы которых ограничены солоноватой водой. В этой ситуации основная цель — опреснение воды. В

ТАБЛИЦА 12.3

Ионы	Вода		
	сырая	после декарбонизации	после установки обратного осмоса
Ca^{2+} мг/л	425	40	4,5
$CaCO_3$			
Mg^{2+}—	200	200	22,5
Na^{+}—	478	763	127
HCO_3^-—	160	0	7,5
CO_3^{2-}—	0	40	0
SO_4^{2-}	521	521	49,5
Cl^-	422	422	97
Общее солесодержание, мг/л	1470	1270	200

ТАБЛИЦА 12.4

Ионы	Концентрация ионов в воде, мг/л	
	после предварительной обработки	после установки обратного осмоса
Ca^{2+}	750	10
Mg^{2+}	850	14
Na^{+}	970	48
HCO_3^-	85	50
SO_4^{2-}	600	14
Cl^-	3280	160
PO_4^{3-}	4,6	—
Общее солесодержание	6540	296
pH	6,2	6.2
Электрическая проводимость, мкСм/см	12000	550

табл. 12.3 и 12.4 приведены результаты работы двух установок по обработке воды с солесодержанием около 1500 и 6000 мг/л.

На первой установке (табл. 12.3) предусмотрена предварительная декарбонизация воды, фильтрование и подкисление до pH = 5,5. Параметры работы установки: P=2,8 МПа, Y = 90% (трехстадийная обработка концентрата).

На второй установке (табл. 12.4) в воду добавляют полифосфаты 5 мг/л и подкисляют ее серной кислотой до pH=5. Параметры работы установки: P = 2,2 МПа, Y = 50% (одностадийная обработка).

Из приведенных данных видно, что степень удаления различных ионов определяется не только их валентностью, но и коэффициентом выхода фильтрации, который изменяется в широких пределах в двух приведенных примерах.

12.1.4.2. Получение ультрачистой воды. Эта вода предназначается для питания котлов, для электронной, фармацевтической промышленности, ядерных установок, а также для лабораторий и госпиталей.

Процесс очистки основан на способности мембран задерживать не только растворенные соли, но и органические молекулы с относительной молекулярной массой, превышающей 70 г/моль, и в особенности мельчайшие частицы, такие как вирусы.

При обработке поверхностных вод обратным осмосом часто удаляют большое количество загрязнений, которые не удаляются в процессе самоочищения водоемов. Этим способом может быть получена очень чистая вода, если схема обработки включает ионообменную установку со смешанной загрузкой для окончательного удаления следов солей, прошедших через мембрану.

Результаты работы установки по удалению органических веществ и микрозагрязнений из поверхностных вод приведены соответственно в табл. 12.5 и 12.6.

12.1.4.3. Обессоливание морской воды. Как отмечалось выше, некоторые мембраны способны удалять более 90% одновалентных ионов. Используя такие мембраны, можно получать питьевую воду, обессоливая в одну ступень морскую воду, что позволяет процессу обратного осмоса конкурировать с дистилляцией. Кроме того, установки с обратным осмосом намного проще и легче в эксплуатации.

Потребление электроэнергии составляет около 8 кВт·ч/м³. Если использовать соответствующие турбины для рекуперации потенциальной энергии концентрата (70% подаваемой насосом воды выходит из установки с давлением более 5 МПа), то можно снизить потребление энергии до менее чем 5 кВт·ч/м³ обессоленной воды. Эти показатели намного лучше показателей большинства дистилляционных установок.

ТАБЛИЦА 12.5. СНИЖЕНИЕ ОКИСЛЯЕМОСТИ ВОДЫ ИЗ УСТЬЯ РЕКИ ЛУАРЫ (ОБРАБОТКА ОБРАТНЫМ ОСМОСОМ ПРИ ДАВЛЕНИИ 2,8 МПа)

Номер опыта	Выход фильтрата Y, %	Перманганатная окисляемость воды, мг/л	
		сырой	обработанной
1	75	10,1	0,6
2	75	12,3	0,5
3	75	10,4	0
4	75	10,4	0
5	75	12,0	0
6	75	51,5	3,8
7	50	51,5	0,3

ТАБЛИЦА 12.6. УДАЛЕНИЕ МИКРОЗАГРЯЗНЕНИЙ (ОБРАБОТКА ВОДЫ ИЗ РЕКИ СЕНА, ВЫШЕ Г. ПАРИЖА ОБРАТНЫМ ОСМОСОМ ПРИ ДАВЛЕНИИ 2,8 МПа)

Продукт	Концентрация в исходной воде, мг/л	Солепропускание	
		при Y=75%	при Y=50%
НСВ—РМ 285	9,8	2	1
Линден ПМ 291	10	2,4	2,1
Паратион РМ 252	2	0,4	0,3

Характеристика качества морской воды, обработанной на установке обратного осмоса, которая была оборудована модулями типа В-10, приведена в табл. 12.7. Условия работы установки: давление 5,6 МПа, Y = 25%, морская вода предварительно подкислялась серной кислотой.

12.1.4.4. Обработка промышленных сточных вод. Экономичность применения обратного осмоса возрастает, если его используют для концентрирования продуктов, содержащихся в промышленных сточных водах, например, при извлечении металлов из сточных вод цехов гальванических покрытий (связанных с покрытием никелем, медью, бронзой и кадмием), а также азота нитратов из конденсатов на заводах по производству азот-

ТАБЛИЦА 12.7

Ионы	Исходная вода, мг/л	Очищенная вода, мг/л	Солепроницание, %
Ca^{2+}	329	1,5	0,5
Mg^{2+}	1031	3	0,3
Na^{+}	9419	77	0,8
K^{+}	355	3	0,8
Sr^{2+}	13	0,2*	—
SO_4^{2-}	2200	1*	0,05
PO_4^{2-}	9	0	—
HCO_3	68	26	38
Cl^{-}	15825	120	0,8
F^{-}	0	0	—
NO_3^{-}	3,4	0	—
SiO_2	0	0	—
Общее солесодержание	32680	185	0,6
Электрическая проводимость, мкСм/см	37250	390	
pH	6,3	6,3	

* Значение находится на границе чувствительности прибора для определения.

ных удобрений. Конечно, было бы не практично извлекать эти вещества из общего стока предприятия. Чтобы предотвратить сброс сточных вод, отрицательно влияющих на эффективность извлечения определенных продуктов, обратный осмос следует применять на выпусках из цехов, где образуется сток, богатый извлекаемыми ионами.

12.1.4.5. Улучшение качества воды, очищенной на традиционных очистных установках. С помощью обратного осмоса можно удалять следы солей и растворенных органических веществ, которые остаются в воде, подвергнутой традиционной обработке (физико-химической, биологической или адсорбционной). Например, в США путем применения обратного осмоса к сточным водам, подвергнутым биологической очистке с предварительной физико-химической очисткой, была доказана возможность использования этой воды для пополнения водоисточников, используемых для хозяйственно-питьевого водоснабжения. В подобных случаях степень очистки может превосходить 92% по остаточной ХПК, 95% по фосфатам и 90% по нитратам при полной дезинфекции этой воды. При этом очень важно, чтобы обрабатываемая вода подвергалась надежной и интенсивной предварительной физико-химической очистке.

12.2. УЛЬТРАФИЛЬТРАЦИЯ

12.2.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Мембраны для ультрафильтрации способны отделять коллоиды и макромолекулы с относительной молекулярной массой, превышающей «барьерный предел» для данной мембраны (см. гл. 3). Поскольку осмотическое давление, которое необходимо преодолеть, пренебрежимо мало, рабочее давление составляет от 0,2 до 0,5 МПа.

Характеристики мембран, используемых для ультрафильтрации, изменяются в широких пределах. Очень многие полимеры и сополимеры обладают сходными свойствами, поэтому невозможно привести их полный перечень. Учитывая это обстоятельство, потребитель должен проконсультироваться со специалистами, чтобы уточнить характеристики данной мембраны, т. е. ее «барьерный предел», химическую стойкость, термостойкость и т. д.

Непрерывная промывка поверхности мембраны для ультрафильтрации так же необходима, как и для обратноосмотических мембран. Во-первых, потому что удельная скорость фильтрования выше (для чистой воды при давлении 0,3 МПа она превышает 200 м³/сут на 1 м² поверхности мембраны) и, во-вторых, по сравнению с ионами, макромолекулы, отложившиеся на поверхности мембран, имеют очень слабую тенденцию диффундировать обратно в жидкость и поэтому могут быть удалены только промывкой поверхности мембраны, что подразумевает работу с очень низкими коэффициентами выхода фильтрата (от 0,5 до 5% при сильно загрязненных жидкостях). Для этого предусматривают систему циркуляции, показанную на диаграмме с высоким уровнем потребления энергии (от 4 до 12 кВт·ч на 1 м³ обработанной воды).

Мембраны выпускают следующих типов: плоские, с подложкой фильтр-прессного типа; плоские, спирально навитые; трубчатые с внутренним поддерживающим цилиндром; трубчатые, в виде полых волокон без поддерживающих устройств; диаметры этих волокон намного больше, чем для обратного осмоса (от 0,5 до 1,5 мм), что позволяет осуществлять подачу сырой воды изнутри волокон.

Выбор тех или иных мембран зависит от свойств обрабатываемой жидкости и их применение требует различной предварительной обработки воды. Наименее склонными к забиванию

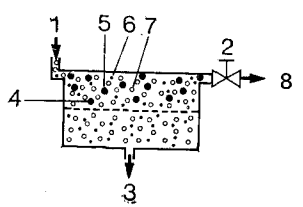


Рис. 12.10.

1 — подача под напором (вода+соли); *2* — регулировочный клапан; *3* — ультрафильтрат (вода + соли); *4* — макромолекулы (белки); *5* — макромолекулы или коллоиды; *6* — соли; *7* — вода; *8* — концентрат (белки)

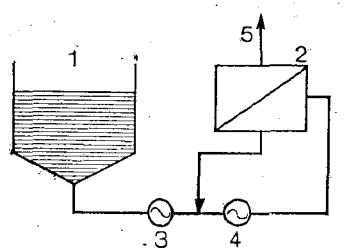


Рис. 12.11

1 — накопитель; *2* — ультрафильтр; *3* — питающий насос (0,4 МПа); *4* — циркуляционный насос (0,15 МПа); *5* — ультрафильтрат

являются, конечно, трубчатые мембраны. Затем следуют плоские, спирально навитые и, наконец, мембраны из полых волокон. Последние требуют тщательной предварительной обработки воды (фильтрование через материалы с размерами пор 10—20 мкм), чтобы избежать преждевременного забивания мембран.

12.2.3. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

В настоящее время ультрафильтрацию применяют с целью:

осветления вин и фруктовых соков, в которых полезные продукты проходят через мембрану;

разделения систем белок — соли (плазма крови);

выделения из молока белка, солей и сахара (для изготовления жидких сыров);

выделения ферментов;

концентрирования макромолекулярных суспензий (поливиниловых спиртов и др.).

Другие области применения связаны с обработкой следующих концентрированных промышленных сточных жидкостей, где концентрат иногда рециркулирует:

- промывных вод от процессов электрофоретической окраски обуви (рециркуляция пигментов и окрасочных смол);
- отработанных растворимых масел; обработка ведется с целью разрушения их (и последующего сжигания) и возврата в производство. В первом случае путем ультрафильтрования отработанных эмульсий с содержанием масла 2—5% их можно сконцентрировать до примерно 40—50% и затем сжечь с возможной рекуперацией тепловой энергии; во втором случае можно обрабатывать так называемые синтетические масла. При этом можно удалить из концентрированного ультрафильтрата загрязнения, которые попали в масло в процессе его использования (металлическая пыль, свободные масла и смазки, абразивные пасты) и вернуть чистую технологическую жидкость (см. гл. 23, с. 726).

12.3. ЭЛЕКТРОДИАЛИЗ

Если жидкость, богатая ионами, подвергается воздействию электрического поля с помощью двух электродов с постоянной разностью потенциалов между ними, катионы будут притягиваться к отрицательному электроду (катоду), а анионы — к положительному электроду (аноду). Если ничего не препятствует их движению, ионы будут разряжаться на соответствующих электродах противоположного заряда и, таким образом, будет происходить процесс электролиза.

С другой стороны, если между электродами поместить ряд селективных диализных мембран, собранных определенным об-

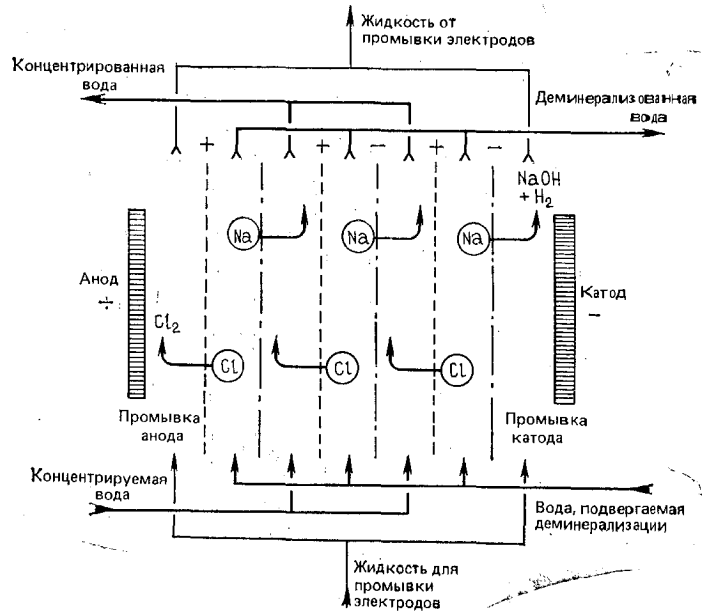


Рис. 12.12

разом (см. гл. 3, с. 90), одни из которых отрицательные и проницаемые только для катионов, а другие положительные и проницаемые только для анионов и расположенные поочередно (как показано на рис. 12.12), то миграция ионов, описанная выше, будет ограничена, поскольку анионы не могут пройти сквозь отрицательные мембраны, а катионы не могут пройти положительные мембраны.

Таким образом, на рис. 12.12 в камеры 1, 2, 3, 4 и 5 подается раствор хлористого натрия, ионы из камер 3 и 5 проходят в камеры 2 и 4 под действием электрического поля электродов. На этом пути вода в камерах 1, 3 и 5 освобождается от солей и становится деминерализованной, в то время как вода в камерах 2 и 4 становится концентрированной в соответствии с количеством солей, поступающих из других камер. На израсходованный 1 кулон электричества выделяется количество анионов и катионов (покидающих камеры деминерализации 1, 3, 5), равное их химическому эквиваленту. Именно на это количество вещества увеличивается содержание солей в камерах 2 и 4.

Поскольку разность потенциалов пропорциональна количеству ячеек, то потребление энергии на 1 кг удаленных солей является более или менее постоянным (т. е. 0,6—0,8 кВт·ч на 1 кг удаленных солей). Поэтому данный процесс пригоден для деминерализации воды. В то же время, неионизированные молекулы (в особенности органических веществ) и коллоиды оста-

Рис. 12.13

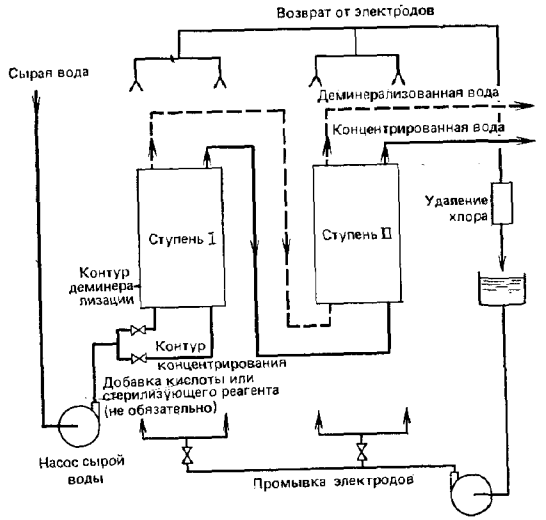
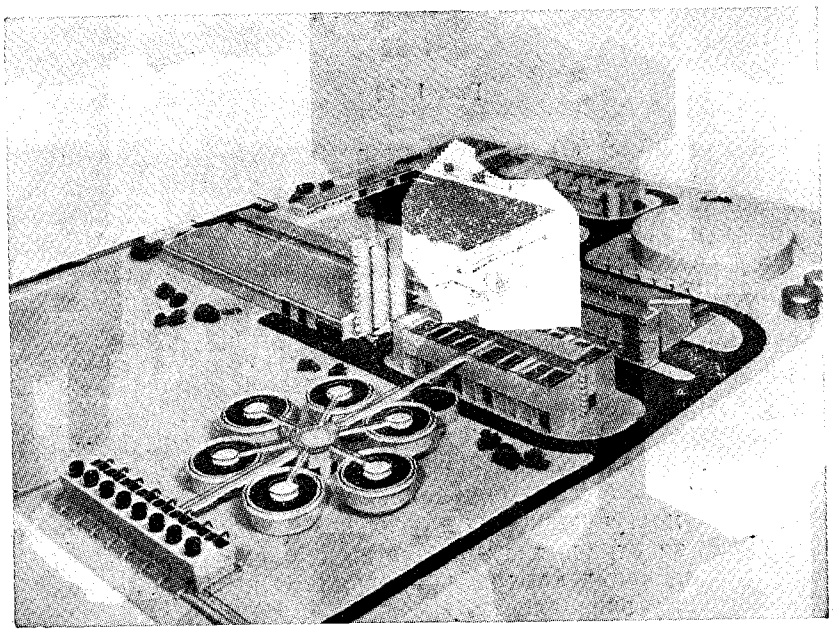


Рис. 12.14. Водоснабжение города Рияд, Саудовская Аравия. Станция Сальбук. Производительность: 60000 м³/сут



ются в обработанной воде. Основные причины, по которым область применения этого метода ограничена, заключаются в том, что:

● невозможно полностью деминерализовать воду, поскольку соответствующие камеры должны иметь слишком большое электрическое сопротивление, ведущее к омическим потерям (вообще говоря, неразумно пытаться снизить солесодержание обработанной воды ниже 300 мг/л);

● стоимость обработанной воды возрастает с увеличением солесодержания исходной воды:

с одной стороны, как мы уже видели, потребление энергии пропорционально количеству удаленных солей;

с другой стороны, если мы хотим избежать потери селективности и обратной диффузии ионов за счет слишком большого химического градиента по обеим сторонам мембраны, то эффективность обессоливания должна быть ограничена. В зависимости от внутренних гидравлических условий в электродиализных установках оптимальный уровень удаления солей, которого можно достигнуть, находится в пределах 40—66% для одной ступени (т. е. солепропускание находится в пределах 60—34%).

Именно по этим причинам большинство электродиализных установок имеет несколько ступеней, соединенных последовательно, посредством чего достигается желаемая степень снижения солесодержания на последующих ступенях (см. рис. 12.13).

Перед подачей сырой воды на электродиализную установку ее необходимо предварительно обработать, чтобы устранить мутность и снизить содержание железа до долей милиграмма на 1 л.

● Все соли, которые могут осаждаться в камерах концентрирования, должны быть предварительно удалены. В расчет следует принимать явление поляризации (см. гл. 3, с. 88), которое при электродиализе стремится не только вызвать избыточную концентрацию ионов, находящихся в обрабатываемой воде, но и изменить значение pH (благодаря местному концентрированию ионов OH^- или H^+), что может усилить тенденцию некоторых загрязнений к осаждению.

Основная область применения электродиализа — получение питьевой воды из солоноватых вод с низким содержанием солей (0,8—2 г/л); в данном случае этот метод сравним с обратным осмосом. Он также имеет преимущества при обессоливании коллоидных и органических растворов (например, с целью деминерализации сыворотки). В этих условиях использование обратного осмоса вызовет увеличение концентрации всех присутствующих в воде веществ и выдаст на выходе деминерализованную воду, в то время как электродиализ удаляет только ионизированные вещества.

13. МАССООБМЕН МЕЖДУ ГАЗОМ И ЖИДКОСТЬЮ

При механической, химической и биологической обработке воды большое значение имеет явление газожидкостного массообмена. Его часто используют с целью растворения газов, таких как воздух, кислород, озон или хлор, в воде, например, при аэрировании в процессе биологической очистки, при удалении железа, дезинфекции и других видах обработки. В некоторых случаях возникает противоположная задача — удаление растворенных газов: диоксида углерода, содержащегося в воде, подвергаемой обессоливанию, кислорода из воды для питания котлов и др. В настоящей главе явление массообмена рассматривается в двух противоположных аспектах. Однако аэрационные системы, применяемые для обработки сточных вод, упомянуты только ради полноты изложения, поскольку они подробно описаны в гл. 8, в которой рассматриваются вопросы аэробной биологической очистки.

В системе жидкость — газ массопередача из одной фазы в другую подчиняется определенным законам и протекает до тех пор, пока не будет достигнуто полное равновесие.

Оптимальные условия для растворения в жидкости газов, содержащихся в газовой фазе, создаются благодаря процессу абсорбции. Десорбция является противоположным процессом, при котором летучие газы, растворенные в жидкости, переходят в газовую фазу. При благоприятных условиях оба этих процесса происходят одновременно. Например, аэрирование воды, богатой CO_2 и бедной кислородом, дает воду, лишенную CO_2 и обогащенную O_2.

13.1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ТЕОРИИ ГАЗОЖИДКОСТНОГО МАССООБМЕНА

В условиях равновесия процессы абсорбции и десорбции подчиняются закону Генри, который утверждает, что при данной температуре концентрация растворенного газа и жидкости пропорциональна давлению этого газа в окружающей газовой фазе. Поэтому чтобы происходил массообмен между жидкостью и газом, парциальное давление газа в газовой фазе должно либо увеличиваться, либо снижаться в зависимости от требуемого направления массообмена.

Парциальное давление газа в смеси определяется законом Дальтона, который вместе с законом идеальных газов позволяет оценить молярные доли различных газов при их парциальных давлениях, которые в сумме составляют общее давление газовой фазы. Следовательно, для смеси газов, занимающей объем V при температуре T и давлении P и состоящей из m_1, m_2, ..., m_n граммов газов с соответствующими молярными массами M_1, $M_2, \ldots, M_n$, которые оказывают парциальные давления p_1, p_2, ..., p_n:

$$P = p_1 + p_2 + \ldots + p_n,$$

$$p_1 m_1 / m_1 = p_2 m_2 / m_2 = \ldots = p_n m_n / m_n.$$

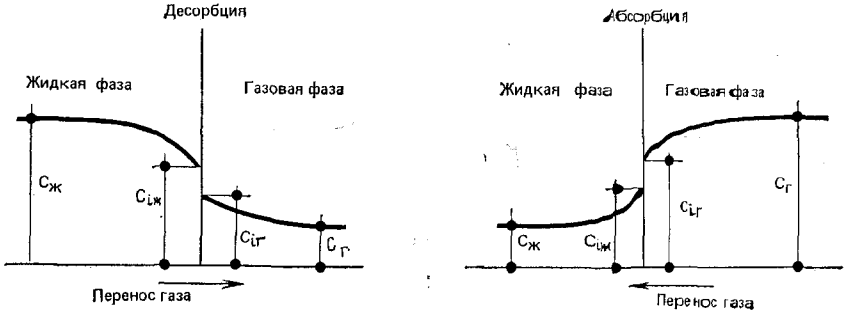


Рис. 13.1

В динамических процессах, согласно теории Уитмена и Льюиса, массопередача между фазами жидкость — газ осуществляется через две пленки с каждой стороны поверхности раздела в соответствии со следующими диаграммами (рис. 13.1).

$C_ж$ и $C_г$ концентрации газа в жидкой и газовой фазах соответственно; $C_{iж}$ и $C_{iг}$ — те же концентрации на поверхности раздела. Измерять можно только $C_ж$ и $C_г$.

В условиях равновесия применимо следующее выражение

$$N = k_ж (C_ж - C_{iж}) = k_г (C_{iг} - C_г),$$

где N — количество газа, прошедшего через границу раздела, не задерживаясь.

В случае десорбции концентрация на границе раздела $C_{iж}$ должна поддерживаться ниже остаточной концентрации $C_{жr}$.

Разность между концентрациями $C_ж$ и $C_{iж}$ подобна разности потенциалов, под действием которой происходит перенос газа; величина $1/k$ может в этом случае рассматриваться как сопротивление переносу. Тот же самый аргумент может быть использован в случае десорбции. Поэтому в динамических условиях могут быть определены следующие два параметра: число единиц переноса (ЧЕП) и эквивалентная высота единицы переноса (ВЕП).

В то время как концепция числа единиц переноса является общей, концепция ВЕП применяется только для непрерывных контактных систем, в которых две фазы циркулируют в противотоке.

Число единиц переноса как бы выражает степень трудности получения заданного массообмена и определяется уравнением (обозначения те же, что и прежде):

для жидкой фазы

$$\text{ЧЕП}_{\text{ж}} = \lg \frac{C_{\text{ж}} - C_{i\text{ж}}}{C_{\text{ж}г} - C_{i\text{ж}}},$$

для газовой фазы

$$\text{ЧЕП}_{\text{г}} = \lg \frac{C_{\text{г}} - C_{i\text{г}}}{C_{\text{г}г} - C_{i\text{г}}},$$

Эквивалентная высота единицы переноса связана с коэффициентом массопередачи и поэтому характеризует сопротивление массопередаче. Она зависит от физико-химической природы соответствующих фаз, гидродинамических характеристик системы (турбулентности), конструкции массообменной колонны и других факторов.

Значение ВЕП определяется для различных газов, растворенных в воде, при помощи экспериментальных кривых, применимых для разных типов контактной насадки массообменных аппаратов. Высота слоя контактной насадки, используемой для решения данной задачи, связана с ЧЕП и ВЕП следующим уравнением применительно к жидкой фазе: $H = \text{ВЕП} \times \text{ЧЕП}$.

Следовательно, чтобы осуществить обеднение или обогащение жидкой фазы, нужно оптимизировать условия, необходимые для облегчения переноса вещества из жидкой в газовую фазу и обратно. Чем жестче будут эти условия, тем больше внимания должно быть уделено вопросам конструирования и проектирования оборудования.

13.2. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ГАЗОЖИДКОСТНОГО МАССООБМЕНА

Для осуществления газожидкостного массообмена при обработке воды можно применять следующее промышленное оборудование: статические и механические аэраторы и смесители; напорные аэраторы; аэраторы для отдувки, известные так же как атмосферные деаэраторы; термические и вакуумные деаэраторы; комбинации вышеперечисленного оборудования.

13.2.1. СТАТИЧЕСКИЕ АЭРАТОРЫ И СМЕСИТЕЛИ

Эти аэраторы используют атмосферный воздух как единственную газовую фазу. Они могут удалять из воды все газы, кроме тех, которые содержатся в воздухе, так же как и обогащать воду кислородом. Статические аэраторы и смесители применяют с целью:

разбрызгивания воды в воздухе;

разбрызгивания или капельного распределения воды в открытом сооружении с естественной или искусственной вентиляцией;

то же, с добавлением движения жидкости через слой соответствующего материала;

распределения воздуха в воде в виде крупных, средних или мелких пузырьков.

13.2.1.1. Разбрызгивание. Вода разбрызгивается с помощью насадок-форсунок, смонтированных на одном или на нескольких трубопроводах. Путем разбрызгивания увеличивается площадь поверхности контакта воздуха с водой, что в равной степени содействует удалению избытка газов и обогащению кислородом. Вода может разбрызгиваться при низком давлении, через большое число форсунок или при давлении 0,08 МПа, в этом случае число форсунок может быть меньше.

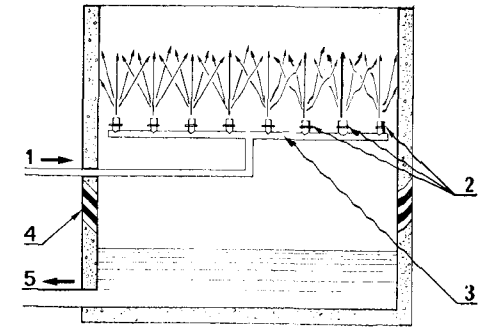


Рис. 13.2. Схема брызгальной башни

1 — аэрируемая вода; *2* — разбрызгивающие насадки; *3*—распределительная система; *4* — вентиляционные окна; *5* — аэрированная вода

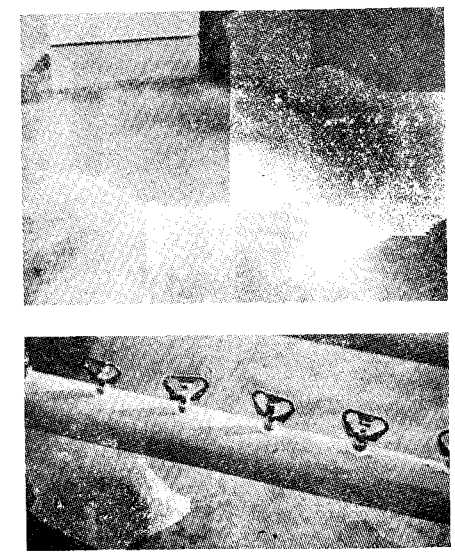


Рис. 13.3. Разбрызгивающие насадки

Такая обработка позволяет удалять до 70% CO_2, а также различные запахи, обусловленные веществами, содержащимися в воде. Она эффективна для обогащения кислородом, обезжелезивания и удаления марганца или насыщения кислородом вод с малым его содержанием или вообще лишенных кислорода.

13.2.1.2. Разбрызгивание воды в воздухе. В зависимости от требуемой степени аэрации применяют пластинчатый аэратор с распылителями или без них с естественной циркуляцией воздуха (рис. 13.4, вверху) либо такой же аэратор, но с вентилятором для увеличения эффективности аэрации в результате более или менее интенсивной продувки (см. рис. 13.4, внизу).

Обычно используют аэраторы типа «водослив» или «пластинчатая колонна» различной степени сложности. Вода падает с

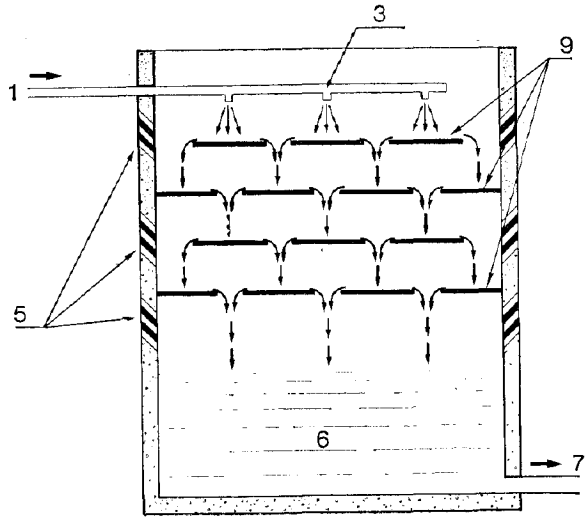
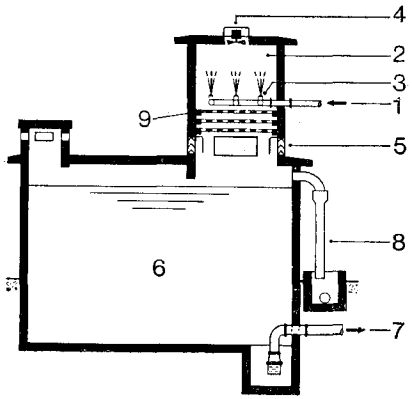


Рис. 13.4. Схема аэрационной установки брызгально-капельного типа (вверху — естественная аэрация; внизу — принудительная

1 — подача обрабатываемой воды; *2* — камера разбрызгивания; *3* — разбрызгивающие насадки; *4* — вентилятор; *5* — вентиляционные окна; *6* — резервуар обработанной воды; *7* — к насосу обработанной воды; *8* — перелив; *9* — капельные пластины



одной ступени на другую в виде тонкой пленки. Необходимое число каскадов и высота падения могут быть определены простым экспериментом, проводимым на месте (см. методики № 701 и 711).

Эффективность работы аэраторов этого типа зависит от способа их изготовления и характеристик обрабатываемой воды.

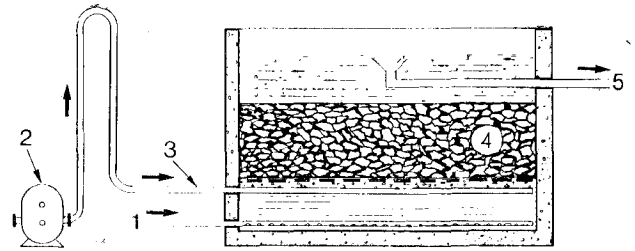
13.2.1.3. Просачивание сквозь контактную загрузку — биологические фильтры. Эта система аэрации упоминается здесь только для более полного освещения вопроса, подробно она описана в гл. 8.

13.2.1.4. Барботаж в глубоких резервуарах. Обрабатываемую воду и сжатый воздух подают в нижнюю часть резервуара, аэрированную воду удаляют с поверхности. Эффективность обработки улучшается в присутствии контактной загрузки, которая существенно увеличивает площадь поверхности контакта жидкости и газа (рис. 13.5). При условии очень интенсивной подачи воздуха [50—100 м^3/(м^2·ч)] и скоростях подачи воды от 10 до 30 м^3/(м^2·ч) может быть достигнута эффективность аэрации 65—75%.

Этот тип аэраторов рекомендуется применять для удаления агрессивной углекислоты с одновременным окислением железа

Рис. 13.5. Схема барботажного аэратора с глубоким слоем

1 — обрабатываемая вода; *2* — воздуходувка; *3* — распределение сжатого воздуха; *4* — контактная загрузка; *5* — сбор аэрированной воды



в подземных водах. Их так же удобно использовать для нитрификации или деаэрации перенасыщенной воды.

Барботаж может быть также применен в любых случаях, когда необходимо обеспечить контакт воды с газом: например, с углекислым газом для рекарбонизации воды после ее обработки известью, с озоном для окисления и дезинфекции и т. д.

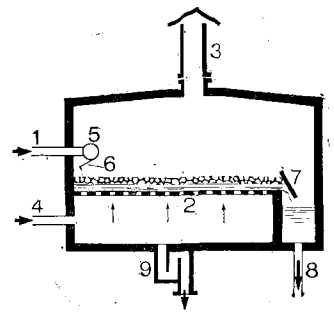


Рис. 13.6. Схема барботажной аэрации в мелком слое воды

1 — подача воды; *2* — перфорированный стальной лист; *3* — выход CO_2; *4* — подача воздуха; *5* — распределительная труба; *6* — отражатель; *7* — перегородка для задержания пены; *8* — выпуск обработанной воды; *9* — сифон

13.2.1.5. Барботаж при малой глубине воды. Воду можно аэрировать введением пузырьков воздуха в слой воды малой высоты. На рис. 13.6 показан аэратор, работающий по этому принципу. Он оборудован горизонтальным днищем из мелкоперфорированного листа нержавеющей стали, над которым протекает обрабатываемая вода при максимальной глубине 25—30 см. Вода обильно вспенивается большим потоком воздуха, подаваемым под днище вентилятором. Вопреки мнению, которое существовало в течение долгого времени, это устройство может, кроме агрессивной CO_2, также удалять часть равновесной CO_2. Поэтому необходимо принимать меры, чтобы избежать образования осадков.

Глубину воды регулируют в зависимости от расхода воды; расход воздуха может изменяться в соответствии с допустимым остаточным содержанием диоксида углерода.

Степень аэрации 85—100% достигается при нагрузках по воде 20—40 м^3/(м^2·ч) поверхности днища и при нагрузках по воздуху, в 30—60 раз превосходящих расходы воды.

Аэраторы этого типа следует выбирать в тех случаях, когда необходимо достичь углекислотного равновесия сырой или фильтрованной воды без увеличения ее минерализации.

13.2.1.6. Распределение газов (диспергирование вдуваемых газов: воздуха, O_2, O_3). При такой обработке сжатый газ дис-

пергируется в массе жидкости, которая может содержать или не содержать взвешенные вещества. Используемое при этом оборудование часто получает название в соответствии с размерами газовых пузырьков, которые оно обеспечивает: крупнопузырчатые аэраторы (газ выпускается либо непосредственно через вертикальные трубы, или через трубы с крупными отверстиями), среднепузырчатые (аэраторы типа Вибрэйр) и мелкопузырчатые (пористые диффузоры).

Аэраторы первых двух типов используются почти исключительно при аэрации сточных вод, третьего типа (в форме куполов, пластин, труб или дисков) — не только в этой области, но и для инжекции других газов, таких как озон, CO_2 и др. (см. с. 229).

Подробное описание различных типов диффузоров приведено в гл. 8, с. 222; о диффузорах для озона рассказывается в гл. 15, см. с. 422.

13.2.2. МЕХАНИЧЕСКИЕ АЭРАТОРЫ И СМЕСИТЕЛИ

Эта группа оборудования включает: поверхностные аэраторы и смесители для глубоких резервуаров с подачей воздуха воздуходувками. Механические аэраторы и смесители используют так же, как и барботеры, для обработки сточных вод (см. гл. 8, с. 223).

13.2.3. НАПОРНЫЕ АЭРАТОРЫ

Напорные аэраторы часто используют для обезжелезивания воды из глубоких скважин. Они сравнимы с аэраторами, описанными в разд. 13.2.4. Закрытые оксигенераторные колонны содержат загрузку из вулканической лавы, расположенную на днище. Воду насосом подают в смеситель, в который так же подают

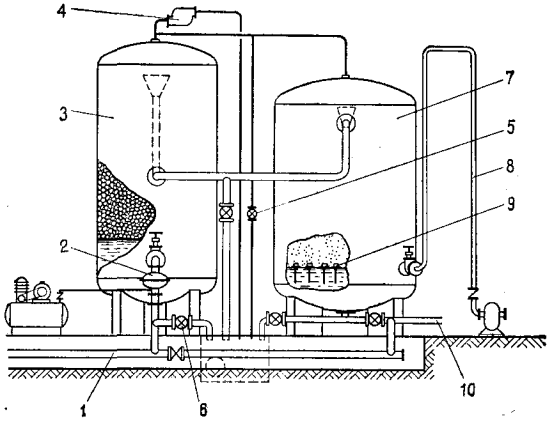
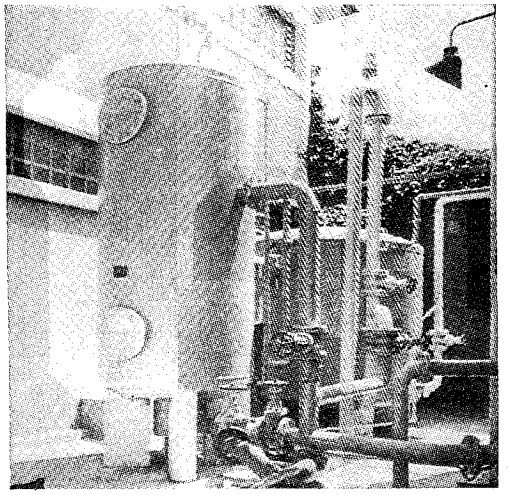


Рис. 13.7. Схема установки для обезжелезивания
1 — подача сырой воды; *2* — перегородчатый смеситель; *3* — окислительная колонна; *4* — выпуск воздуха; *5* — клапан выпуска воздуха; *6* — клапан опорожнения; *7* — песчаный фильтр; *8* — подача воздуха; *9* — днище с колпачками; *10* — обезжелезенная вода

Рис. 13.8. Окислительная колонна и фильтр для обезжелезивания питьевой воды (производительность 50 м³/ч)



сжатый воздух. Водовоздушную смесь подают в нижнюю часть слоя насадочного материала. Весь избыточный воздух выпускают в атмосферу через воздушный клапан. Вода собирается в верхней части колонны (рис. 13.7).

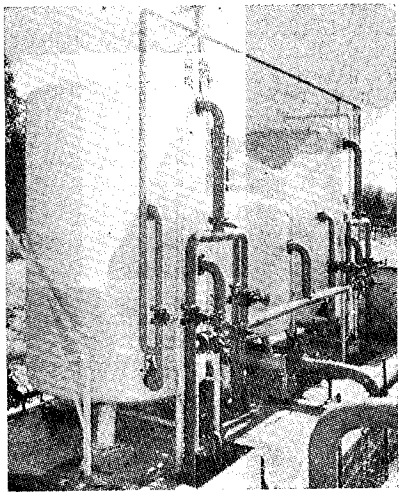


Рис. 13.9. Обезжелезивающая установка производительностью 150 м³/ч

13.2.4. ДЕАЭРАТОРЫ ДЛЯ ОТДУВКИ ГАЗОВ

В устройствах этого типа газы или летучие соединения, растворенные в жидкой фазе, выдуваются из нее в результате противоточной продувки жидкости вытесняющим газом; этот вытесняющий газ может быть паром. Содержание газа, который необходимо удалять, в вытесняющем газе должно быть практически равно нулю. При данной температуре концентрация газа в жидкой фазе пропорциональна его парциальному давлению в газовой фазе, т. е. его концентрации в газовой фазе. До тех пор, пока существует неравновесное состояние, газ будет переходить из одной фазы в другую. Поэтому при обработке такого типа жидкость обедняется газами, не содержащимися в вытесняющем газе, и обо-

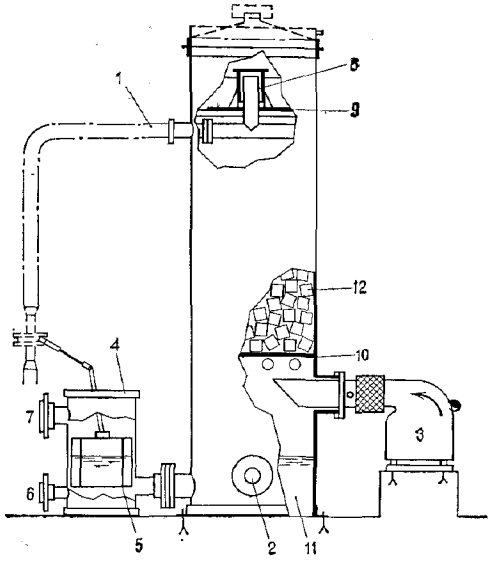


Рис. 13.10. Схема установки для удаления CO_2

1 — подача воды; *2* — отвод воды; *3* — вентилятор; *4* — регулятор расхода; *5* — поплавок; *6* — патрубок опорожнения; *7* — перелив; *8* — распылительное устройство; *9* — распределительная пластина; *10* — плита, поддерживающая насадку; *11* — резервуар для воды; *12* — контактная насадка

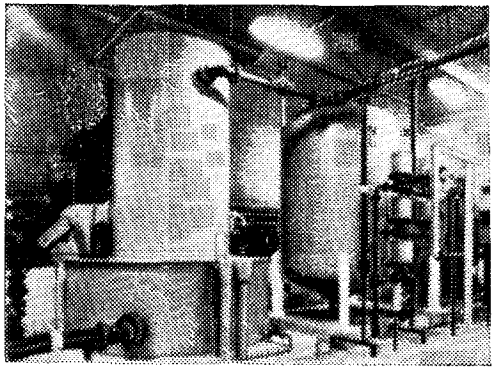


Рис. 13.11. Установка для удаления CO_2. Фабрика SEAT, Барселона, Испания

гащается газами, которые он содержит. Конечная концентрация газа в жидкой фазе, следовательно, будет пропорциональна парциальному давлению этого газа в газовой фазе.

Деаэраторы для отдувки газов должны иметь следующие характеристики:

разбрызгивание или очень хорошее распределение воды по поперечному сечению колонны;

большую площадь поверхности контакта между жидкой и газовой фазами;

высокую чистоту вытесняющего газа, который должен иметь практически нулевое содержание газа, количество которого в обрабатываемой жидкости необходимо снизить;

хорошее распределение вытесняющего газа по днищу колонны;

точно рассчитанные расходы воды и вытесняющего газа, обеспечивающие желаемый остаточный уровень растворенного газа.

Наименование установок такого типа изменяется в зависимости от функций, которые они выполняют; например, установка для удаления CO_2, установки для удаления сероводорода и др.

13.2.4.1. Установки для удаления CO_2. В этих установках вода либо разбрызгивается, либо тонко диспергируется и равномерно распределяется над слоем насадки, обычно состоящей из колец Рашига или аналогичных элементов,

вулканической лавы, кокса и др. Сильный поток воздуха от вентилятора подается под перфорированное днище, поддерживающее загрузочный материал. Вода и воздух циркулируют в противотоке. После дегазации вода собирается в резервуаре, расположенном в нижней части контактной колонны.

Как указывалось в разделе 13.1, остаточное содержание CO_2 в жидкой фазе (т. е. в воде) зависит от температуры и транзитного расхода воды, типа насадки и ее объема, а также от расхода воздуха.

Ориентировочные значения параметров работы установки «Дегремон» составляют: расход воды 30—50 $м^3/(м^2 \cdot ч)$; расход воздуха примерно в 50 раз больше, чем воды; высота слоя загрузки 1,5—2,5 м.

При правильно рассчитанной установке для удаления CO_2 могут быть получены концентрации, очень близкие к равновесным.

Это оборудование можно использовать и (при очень близких условиях) для удаления H_2S отдувкой воздухом.

13.2.4.2. Отгонка паром (удаление аммиака).

Растворимость газов снижается с увеличением температуры; чем выше температура, до которой нагрета жидкость, тем легче они могут быть удалены. Растворимость и стабильность аммиака в воде настолько велики, что этот газ может быть удален только отдувкой паром. Газовая фаза, обогащенная неконденсируемыми веществами, включая и аммиак, непрерывно удаляется и далее подвергается обработке с целью извлечения или разрушения аммиака.

Во всех случаях должны быть предусмотрены специальные мероприятия, если вдруг опасно повысится концентрация газов в процессе обработки воды, которая может вызвать коррозию, взрыв, затруднение дыхания и т. д.

13.2.5. ТЕРМИЧЕСКИЕ ДЕАЭРАТОРЫ

Этот тип аэраторов в основном используют для удаления растворенного кислорода и диоксида углерода из воды, подаваемой на парогенераторы, чтобы защитить теплообменники, первичные нагреватели и пароводяные контуры от коррозии.

Процесс физической дегазации воды основывается на законах, определяющих растворимость газов. Согласно закону Генри, массовая концентрация газа, растворенного в жидкости при данной температуре, пропорциональна его парциальному давлению в атмосфере над слоем жидкости (см. с. 370). В то же время растворимость газа в воде является функцией температуры.

Теоретически, согласно первому закону, вода может быть деаэрирована путем поддержания соответствующего давления и температуры насыщенного пара в сосуде, в котором находится вода; тогда растворенные газы автоматически перейдут в паровую фазу. Если имеет место непрерывный поток воды через этот

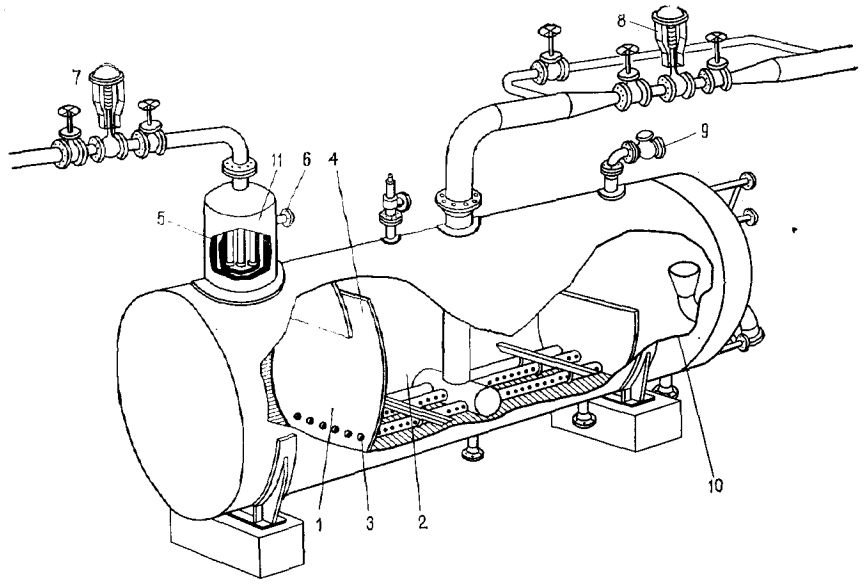


Рис. 13.12. Схема деаэратора Дегремон

сосуд, газы должны удаляться в атмосферу как только они поступят в паровую фазу. Это действительно происходит, когда давление внутри сосуда выше атмосферного. Если сосуд находится под давлением ниже атмосферного, необходимо использовать эжектор или вакуумный насос.

Если для процесса деаэрации выбраны соответствующие вакуум или давление, то применяемое оборудование должно обеспечивать три следующие условия:

максимальную площадь поверхности контакта вода — пар;

температуру воды, максимально близкую к температуре насыщенного пара при данном давлении;

парциальное давление удаляемого газа ниже чем то, которое соответствует требуемому его содержанию в конце процесса в соответствии с законом Генри.

13.2.5.1. Деаэратор «Дегремон» предназначен для работы при давлениях 30 кПа и выше. При обработке холодной воды при температуре насыщенного пара, соответствующей рабочему давлению, он позволяет получить воду, содержащую менее 7 мкг/л растворенного кислорода.

Деаэратор «Дегремон» (рис. 13.12) представляет собой горизонтальный резервуар, состоящий из трех камер: камеры нагрева *1*, снабженной распылительным устройством; камеры кипения *2* с трубчатой системой распределения пара. Эта камера связана с первой камерой в нижней части, занятой жидкой фазой, серией калиброванных отверстий *3*, а в верхней части —

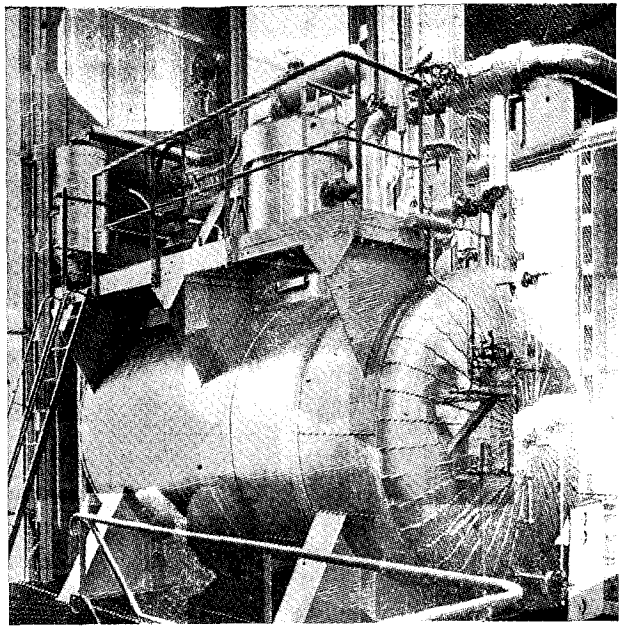


Рис. 13.13. Термический деаэратор для подготовки питательной воды для котлов (производительность 10 м³/ч)

отражательными перегородками *4*, расположенными в газовой фазе; камеры деаэрированной воды *10*, отделенной от предыдущей камеры перегородкой и соединенной с ней в нижней части.

Вода, распыленная в первой секции, нагревается, поскольку она конденсирует пар, удаляемый из камеры кипения через отражательные перегородки *4*. Смесь необработанной воды и сконденсированного пара поступает в камеру кипения через отверстия *3* и вступает в тесный контакт с паром. В секции *10* вода отделяется от пара и между этой секцией кипения, под действием разности плотностей воды и пароводяной смеси, устанавливается естественная циркуляция. Таким образом, перед выходом из резервуара вода неоднократно вступает в контакт с горячим паром, что увеличивает глубину процесса деаэрации.

Газы, перешедшие в паровую фазу, удаляются через кольцевое пространство *11* вокруг распылительной камеры *5*, где снижение температуры увеличивает частичную конденсацию пара. Газы, смешанные с паром в равном соотношении, удаляются из сооружения через специальную трубу *6*, которая оборудована диафрагмой, рассчитанной таким образом, чтобы поддерживать рабочее давление в сооружении.

Количество воды, подаваемой на деаэратор, регулируется клапаном *7* в соответствии с уровнем в резервуаре и, таким образом, в соответствии с ее расходом. Постоянное давление поддерживается в контуре деаэрации клапаном *8*, который дроссе-

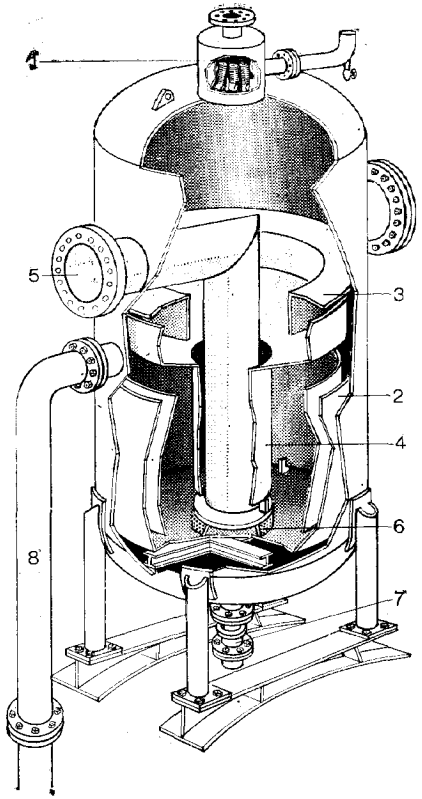


Рис. 13.14. Схема куполообразного деаэратора

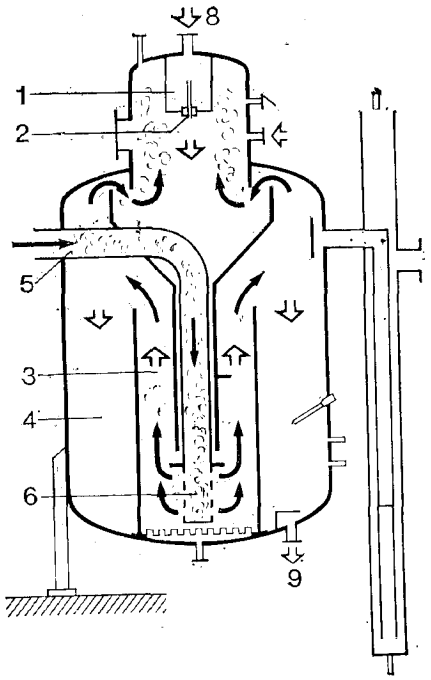


Рис. 13.15. Схема вертикального деаэратора

1 — камера распыления; *2* — распылитель; *3* — зона кипения; *4* — накопитель; *5* — труба впуска пара; *6* — зона барботажа; *7* — гидравлический сифон; *8* — обрабатываемая вода; *9* — деаэрированная вода

лирует впуск пара на входе. Этот деаэратор также оборудован клапаном сброса вакуума *9*, который предотвращает опорожнение аппарата в результате конденсации пара, и устройством, предотвращающим возникновение избыточного давления. Это устройство представляет собой либо гидравлический сифон, который также обеспечивает перелив воды из сооружения, если рабочее давление превышает 0,03 МПа, либо предохранительный клапан давления (один или более). В последнем случае сооружение имеет переливную трубу, которая перекрывается клапаном, открываемым по сигналу датчика давления.

13.2.5.2. Куполообразный деаэратор, устанавливаемый в резервуаре. Эта модель очень удобна для работы в условиях, когда часто производятся пуск и остановка деаэратора; надежность работы практически не зависит от колебаний расхода. Купол, который может быть легко смонтирован в существующем резервуаре, выполняет не только функции нагревателя, но и барботера, уже описанные ранее.

Куполообразный деаэратор работает следующим образом (рис. 13.14).

Вода диспергированная в распылителе *1*, в верхней части купола вступает в контакт с частью пара, поступающего из камеры кипения *2*, и в результате этого нагревается. Она собирается диском *3* и отводится по трубе *4*, внутри которой проходит труба распределения пара *5*, оканчивающаяся термостойким диффузором *6*. Вода в тесном контакте с паром переливается из камеры кипения и отводится по трубе *7* в резервуар деаэрированной воды. И под куполом, и в резервуаре поддерживается одинаковое давление с помощью уравнительной трубы *8*.

Камера кипения имеет оборудование, обеспечивающее циркуляцию за счет разности плотностей, что значительно улучшает эффективность дегазации.

Как и в предыдущих моделях, парогазовая смесь выпускается через трубу в верхней части распылительной камеры, в самой холодной зоне.

13.2.5.3. Вертикальный деаэратор может быть использован преимущественно для деаэрации воды с расходом, не превышающим 25—30 м³/ч при давлении 30 кПа. Он может многократно запускаться и останавливаться на длительные периоды (например, на выходные дни).

Его конструкция (рис. 13.15) основана на принципах, использованных в деаэраторах купольного типа.

13.2.6. ВАКУУМНЫЙ ДЕГАЗАТОР

Кроме термических дегазаторов, вакуумный дегазатор является единственным типом оборудования, на котором возможно удаление газов, растворенных в воде, без обогащения воды другими газами, поскольку оба сооружения создают газовую фазу, состоящую частично или полностью из пара. Вакуумный дегазатор не имеет альтернативы в тех случаях, когда условия проведения процесса таковы, как описано выше, и когда обработка должна производиться при температурах менее 100 °С.

Сооружение работает при общем давлении в газовой фазе, равном сумме давления пара и парциальных давлений газов при температуре воды, поступающей на обработку.

Вакуумный дегазатор «Дегремон» состоит из герметичного вертикального резервуара, внутри которого расположены одна, две или три горизонтальные перегородки, несущие на себе загрузку из колец Рашига или аналогичных материалов. Каждый из получившихся отсеков образует ступень дегазации. Примем расход на всех ступенях одинаковым. Необходимое число ступеней будет зависеть от количества газа, которое необходимо удалить, и конечного остаточного его содержания. Каждая стадия представляет собой определенное число единиц переноса для соответствующего газа. В трехстадийном дегазаторе вода раз-

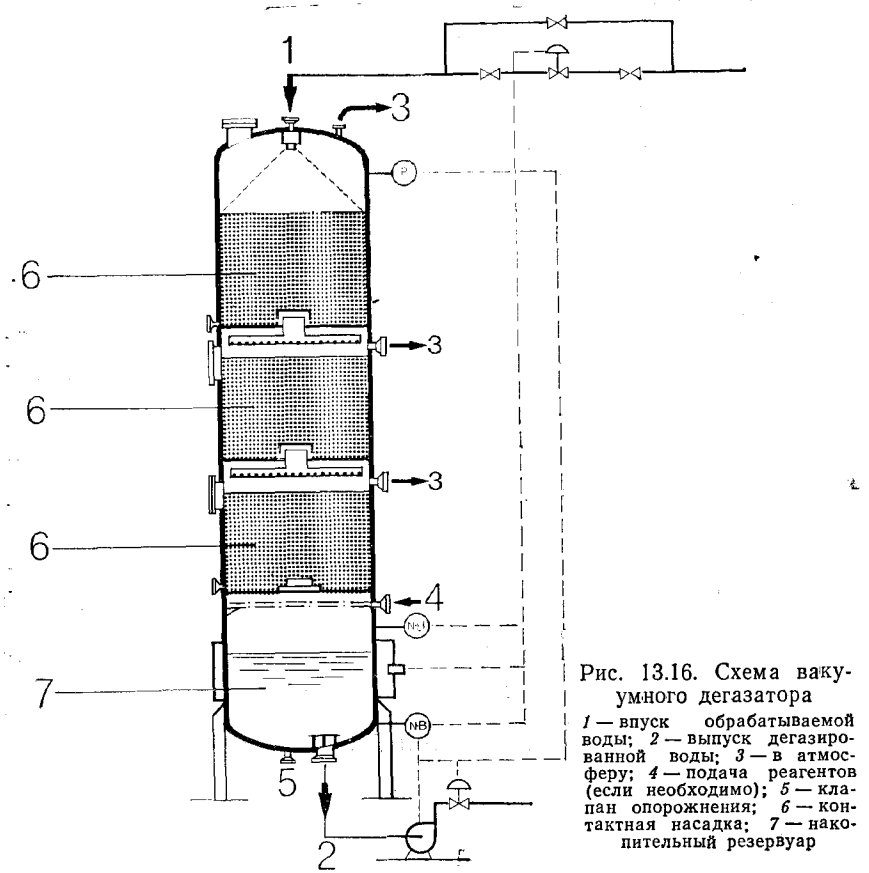


Рис. 13.16. Схема вакуумного дегазатора

1 — впуск обрабатываемой воды; *2* — выпуск дегазированной воды; *3* — в атмосферу; *4* — подача реагентов (если необходимо); *5* — клапан опорожнения; *6* — контактная насадка; *7* — накопительный резервуар

брызгивается по поверхности загрузки первой ступени (верхняя ступень), проходит сквозь загрузку и собирается устройством, которое распределяет ее затем по поверхности загрузки второй ступени. Этот процесс повторяется и на третьей ступени. Каждый распределитель оборудован сифоном, позволяющим использовать убывающие давления от верхней ступени к нижним. Затем вода выпускается в накопительный резервуар, который находится под тем же вакуумом, что и последняя ступень, из которого вода насосом подается потребителю.

Вакуум создается одним из следующих способов:

вакуумными насосами, смонтированными по одному на каждой ступени. Насосы работают при одном и том же расходе и поэтому они взаимозаменяемы; давление каждого насоса соответствует давлению той ступени, на которую он работает;

эжекторами (по одному на каждую ступень). В этом случае один насос питает все эжекторы, а последние рассчитывают та-

Рис. 13.17. Три вакуумных деаэратора производительностью 700 м³/ч каждый

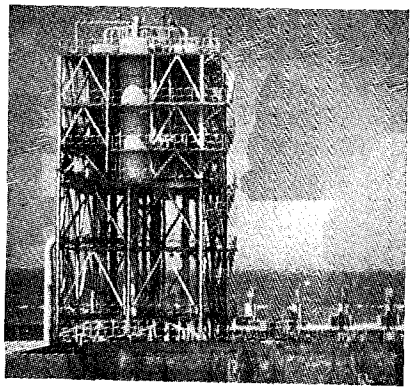
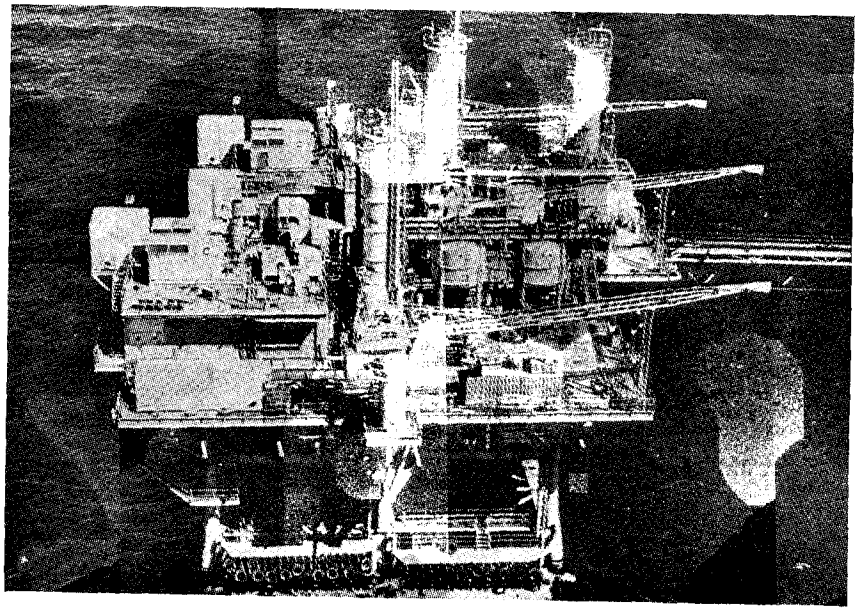


Рис. 13.18. Нефтяная платформа в Дюбаи (Персидский залив), оборудованная тремя вакуумными деаэраторами производительностью 750 м³/ч каждая (предоставлена компанией Инфилко Дегремон)



ким образом, чтобы обеспечить на каждой ступени тот вакуум, который необходим;

паровым эжектором барометрического типа, обычно двухступенчатой конструкции.

Все оборудование должно быть изготовлено в строгом соответствии с принятыми нормативами и надежно герметичным, поскольку проникание воздуха ухудшает качество очистки.

Вакуумные дегазаторы имеют оборудование для контроля и управления, приспособленное к условиям работы под вакуумом. Некоторые дегазаторы снабжены устройствами, распределяю-

щими пар под перегородками, поддерживающими загрузку; более высокая температура, полученная в результате этого, дает возможность работать при более высоком абсолютном давлении, поскольку более низкие давления трудно поддерживать на последней ступени.

Вакуумные дегазаторы, работающие при температурах окружающей среды, используют преимущественно при обработке воды (пресной или морской) перед ее закачкой в нефтяные пласты.

13.2.7. КОМБИНИРОВАННЫЕ ДЕГАЗАТОРЫ

Обрабатываемая вода иногда содержит не только растворенные газы из атмосферы, но и другие газы и должна обрабатываться при температуре окружающей среды. Например, при подкислении морской воды с целью предотвращения отложения бикарбонатов. Количество диоксида углерода, образующегося при этом, может достигать 150—200 мг/л, что значительно увеличивает объем газа, который необходимо удалять, и, следовательно, повышает капитальные и эксплуатационные затраты. В этих случаях выгоднее удалять газы в две ступени: сначала CO_2 на атмосферном деаэраторе, а затем оставшиеся растворенные газы на вакуумном дегазаторе до требуемого предела по остаточным концентрациям.

14. ХИМИЧЕСКАЯ КОРРЕКТИРОВКА СВОЙСТВ ВОДЫ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ

Основная цель различных способов обработки воды, описанных в предыдущих главах, — очистка воды от нежелательных веществ. В этой главе рассматриваются все реагенты, которые добавляют в воду для корректировки ее химических свойств и кондиционирования (эти термины являются синонимами, однако последний из них обычно применяется в водоподготовке для промышленности).

Корректировку химических свойств и кондиционирование проводят в следующих целях:

придают воде новые свойства, которые сделают ее пригодной для предполагаемого использования. В этом случае добавляют соли в очень мягкие воды (см. «Обогащение воды солями», с. 392),

осуществляют аэрацию для введения кислорода (см. гл. 13), вводят соединения фтора (см. гл. 20), осуществляют обработку воды, чтобы предупредить коррозию и избежать образования отложений и вводят биоцидные реагенты;

с помощью введения соответствующих реагентов исключают вредное воздействие веществ, содержащихся в воде. К этому виду обработки воды относится изменение pH, которое в ряде случаев является побочным результатом другого вида обработки воды и поэтому в настоящей главе не рассматривается, и химическое обескислороживание воды.

14.1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПРОЦЕССОВ КОРРЕКТИРОВКИ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ

14.1.1. ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ КОРРОЗИИ

14.1.1.1. Питьевой водопровод и различные производственные системы. Механизмы коррозии, описанные в гл. 2 (см. с. 27 и последующие), таковы, что даже если вода находится в состоянии углекислотного равновесия, т. е. не растворяет карбонатные отложения и не образует их, она тем не менее может вызывать коррозию незащищенных чугунных или стальных труб. Существуют различные методы защиты металла от коррозии, среди которых, в частности, образование защитного слоя с помощью одного из двух методов:

● естественным отложением защитного слоя Тильманса (см. с. 36), представляющего собой смесь карбоната кальция, гидроксида железа и карбоната железа. Для образования этого защитного слоя, необходимо, во-первых, чтобы значение pH воды соответствовало состоянию углекислотного равновесия при данной температуре; во-вторых, чтобы общая щелочность и кальциевая жесткость были достаточно высоки (не менее 1,4 мг-экв/л для вод с низкой концентрацией сульфатов и хлоридов, хотя эти минимальные значения должны быть повышены в присутствии солей сильных кислот, особенно хлоридов), и, в-третьих, чтобы концентрация растворенного кислорода была не менее 4—5 мг/л. Многие воды не отвечают данным условиям, поэтому в зависимости от обстоятельств применяют следующие методы коррекции качества воды:

нейтрализацию угольной кислоты до состояния равновесия;

обогащение солями воды, не содержащей карбонат кальция (мягкие воды из скальных пород, опресненная вода);

повышение концентрации растворенного кислорода.

● обработкой воды с целью образования пленки (см. Ингибиторы коррозии, с. 398). В тех случаях, когда не выполняются упомянутые выше условия, необходимые для создания защитного карбонатного слоя, образование защитной пленки на трубе достигается обработкой воды фосфатами, силикатами, хроматами, солями цинка или органическими веществами. Эти соединения могут быть использованы в равной степени в открытых или закрытых контурах или в водоводах.

14.1.1.2. Вода для питания котлов и теплообменных аппаратов. Эта основная область применения методов кондиционирования воды описана в гл. 22.

14.1.2. ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ

Описанный выше процесс образования защитного карбонатного слоя является самоограничивающимся: он прекращается, когда не остается незащищенной поверхности металла. Однако если pH воды выше, чем pH насыщения карбонатом кальция (из-за недостатка равновесной CO_2), продолжается образование отложений карбоната кальция, и это может привести к полному зарастанию трубы. Методы защиты, рассматриваемые в этой главе (т. е. отличные от умягчения, декарбонизации и обессоливания), в основном включают обработку воды кислотой, введение диоксида углерода (восстановление углекислотного равновесия в воде, умягченной при избытке извести) или химическое кондиционирование (которое применяется в основном в производственных системах, см. подразд. 14.2.3).

Способ обработки питьевой воды кислотой для предотвращения образования отложений применяется редко, хотя он часто используется в производственных системах водоснабжения (охлаждающие контуры) и в качестве предварительной обработки перед опреснением воды.

Образование отложений может быть вызвано не только карбонатом кальция, но и другими солями, например сульфатом кальция в пересыщенном растворе (растворы после регенерации ионообменных фильтров; вода в контурах систем охлаждения при высокой степени концентрирования, при опреснении морской воды; выщелачивающие растворы в гидрометаллургии). В этих условиях, помимо методов с применением затравочных кристаллов, может также успешно применяться химическое кондиционирование воды.

14.1.3. БОРЬБА С БИОЛОГИЧЕСКИМИ ОБРАСТАНИЯМИ

Для предотвращения роста разнообразных микроорганизмов (бактерий, плесеней, водорослей) и образования биологических обрастаний в производственных системах водоснабжения используют некоторые химические реагенты (см. с. 720).

14.1.4. НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ РАЗЛИЧНЫХ СТОКОВ

Перед сбросом стоков в водоемы необходимо отрегулировать значение pH, чтобы удовлетворять существующим требованиям, предъявляемым к кислым и щелочным производственным сточным водам, а также к кислым стокам, образующимся при шахтном водоотливе.

Некоторые промышленные сточные воды также необходимо нейтрализовать (снизить избыточную кислотность или щелочность, pH) перед дальнейшей очисткой (биологической или физико-химической).

14.2. ОСНОВНЫЕ ПРОЦЕССЫ

14.2.1. КОРРЕКТИРОВКА pH (НЕЙТРАЛИЗАЦИЯ)

Следует помнить, что иногда возможна корректировка pH с помощью физических методов, предусматривающих применение адсорбции и десорбции газа из воды (это имеет особое значение для удаления диоксида углерода, см. гл. 13). Здесь мы рассмотрим только применение химических реагентов.

14.2.1.1. Применение щелочных реагентов. В процессе подготовки воды для хозяйственно-питьевого водоснабжения при корректировке pH вводят следующие реагенты: каустическую соду, известь и соду. При подготовке воды для промышленности, кроме перечисленных реагентов, в особых условиях применяют:

- окись лития — в атомной промышленности;
- нейтрализующие амины (аммиак, циклогексиламин, этаноламин, морфолин и т. д.) при обработке воды для питания котлов: при конденсации пара эти реагенты соединяются с растворенной углекислотой, образуя углекислые амины. Коэффициенты распределения CO_2 между фазами котловой воды и пара таковы, что дозы аминов могут быть значительно меньше, чем стехиометрические количества, рассчитанные по CO_2, выделяющейся в котле. При низких и средних давлениях дозы аминов составляют 1 г на 1 г выделяющейся CO_2. При высоких давлениях после термической дегазации дозы составляют около 1 г/м^3 воды;
- карбонат кальция в виде порошка для нейтрализации промышленных сточных вод.

К чистоте реагентов, используемых при водоподготовке для промышленности, не предъявляются также жесткие требования, как в случае подготовки питьевой воды, где качество реагентов должно тщательно проверяться, и особенно при использовании каустической соды, которая не должна содержать ртути. При содержании в воде углекислоты добавление этих реагентов приводит к образованию бикарбонатов. При содержании в некоторых промышленных стоках сильных кислот образуются нейтральные соли. Известь, благодаря ее низкой стоимости, применяют наиболее часто.

Реагенты вводят в воду:

- в виде порошка (известь, карбонат натрия) с помощью сухих дозаторов (см. с. 557),
- в виде растворов или суспензий насосами-дозаторами или гравитационными дозаторами (см. с. 552); если для регулирования pH очищенной воды вводят известь, желательно использовать сатураторы, так как в них задерживаются частицы недожога и получается прозрачная известковая вода. Применение известкового молока вызывает повышение мутности воды, степень которой зависит от чистоты товарного продукта и требуемой дозы извести.

Эффективность обработки зависит от того, насколько хорошо нейтрализующий реагент смешивается с водой: поэтому процесс нейтрализации следует производить в реакторах, оборудованных мешалками или в «Турбакторах», которые обеспечивают наилучшие условия смешивания.

14.2.1.2. Фильтрование через нейтрализующие зернистые материалы. Этот вид обработки, при котором используются вещества на основе карбоната кальция в смеси с карбонатом магния или оксидом магния, наиболее часто применяют для удаления агрессивной углекислоты, которая в процессе фильтрования образует бикарбонаты. В прошлом для этой цели широко использовали мрамор, но из-за малой скорости реакции и невозможности достичь состояния полного равновесия сейчас предпочитают применять другие реагенты, известные под их торговыми наименованиями «Нютралайт», «Магно», «Акдолит» и т. д. Кинетика их взаимодействия с углекислотой обеспечивает полную эффективность процесса даже при относительно малой массе реагента.

Эти гранулированные реагенты в основном используют в напорных фильтрах. Иногда применяют открытые фильтры.

В принципе возможно фильтрование снизу вверх и сверху вниз. При фильтровании сверху вниз нейтрализующая загрузка выполняет одновременно функции механического фильтра, в процессе фильтрования происходит уплотнение и загрязнение загрузки, степень которого зависит от качества обрабатываемой воды. Поэтому необходима обратная промывка, в связи с чем применяют стандартные фильтры, обеспечивающие возможность расширения фильтрующей загрузки при промывке с высокой интенсивностью. Промывка производится с помощью насоса или от водонапорной башни. Для снижения количества промывной воды используют водовоздушную промывку.

При фильтровании воды снизу вверх теоретически нет необходимости в расширении и промывке загрузки, однако без промывки нейтрализацию фильтрованием следует применять только для обработки чистой воды, не содержащей взвешенных веществ.

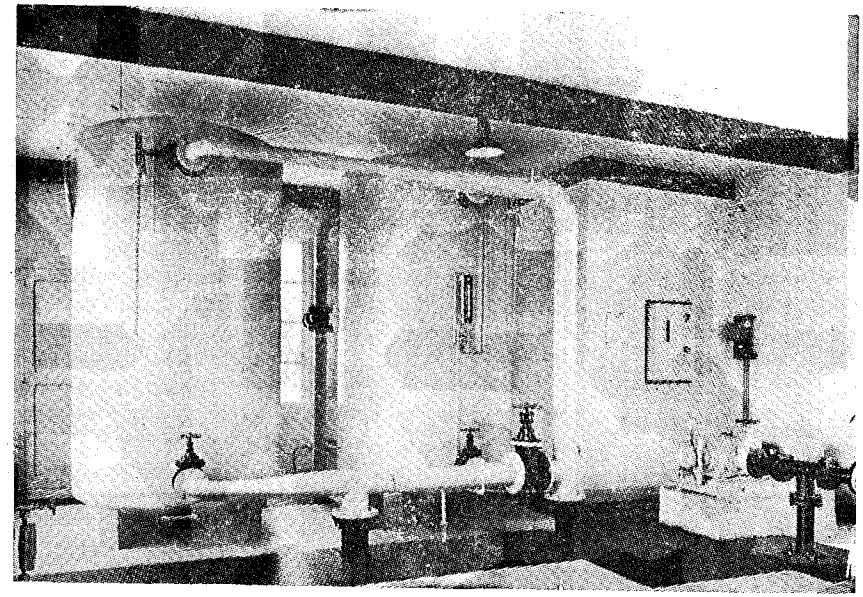


Рис. 14.1. Нейтрализация с применением «Нютралайта». Справа виден хлоратор. Производительность 25 м³/ч

Некоторые нейтрализующие материалы в процессе производства подвергаются обжигу и поэтому характеризуются высоким содержанием оксидов щелочно-земельных металлов. В начале работы они сильно повышают щелочность воды, которая со временем постепенно уменьшается.

«Нютралайт», который не содержит свободной щелочи, не имеет этого недостатка, стабилен в течение длительного времени и поэтому его широко применяют (ему будет уделено особое внимание в настоящем разделе). Имеется «Нютралайт» с различным размером зерен. Он состоит из карбонатов кальция и магния, и его структура обеспечивает быстрое и равномерное растворение, которое всегда пропорционально количеству нейтрализованной CO_2.

В зависимости от концентрации CO_2 с помощью 1 м³ «Нютралайта» можно обрабатывать от 3 до 10 м³ воды в час. Высота фильтрующего слоя «Нютралайта» составляет 0,8—1,5 м. Потери напора в чистой загрузке в зависимости от скорости фильтрования и высоты загрузки составляют 0,2—0,5 м. Однако следует учитывать возможность загрязнения загрузки и предусматривать рост потерь напора до 1 м.

В зависимости от условий расход материала загрузки изменяется от 1,6 до 2,2 ч на 1 г нейтрализованной углекислоты, поэтому периодически необходимо частично перегружать фильтры,

ТАБЛИЦА 14.1

Реагент	Потребление чистого вещества на 1 г. агрессивной CO_2	Увеличение жесткости на 1 г агрессивной CO_2 мг-э/л	Реакция
Известь $Ca(OH)_2$	0,84	0,023	$2CO_2+Ca(OH)_2=Ca(HCO_3)_2$
Едкий натр NaOH	0,91	0	$CO_2+NaOH=NaHCO_3$
Карбонат натрия Na_2CO_3	2,4	0	$CO_2+Na_2CO_3+H_2O=2NaHCO_3$
Мрамор $CaCO_3$	2,3	0,044	$CO_2+CaCO_3+H_2O=Ca(HCO_3)_2$
Оксид магния MgO	0,45	0,22	$2CO_2+MgO+H_2O=Mg(HCO_3)_2$
«Нютралайт»	1,6—2,2	0,024—0,044	$3CO_2+CaMgOCO_3+2H_2O=Ca(HCO_3)_2+Mg(HCO_3)_2$

чтобы компенсировать количество материала, растворенного в воде. Сведения о потребности нейтрализующих реагентов приведены в табл. 14.1.

14.2.1.3. Подкисление воды применяют в основном с целью предотвращения образования отложений, предварительной обработки воды перед опреснением, нейтрализации щелочных стоков и регулирования pH после умягчения известью.

При подкислении воды диоксидом углерода необходимо использовать следующее оборудование: емкости или баллоны, расходомеры и реактор для растворения CO_2 в воде. При подкислении серной и иногда соляной кислотой применяют насосы-дозаторы.

14.2.1.4. Взаимная нейтрализация. В некоторых случаях можно избежать применения реагента, используя взаимодействие двух или более вод с противоположными характеристиками: агрессивные воды и воды, образующие отложения (однако для достижения точного углекислотного равновесия часто требуется дополнительно вводить реагент), а также кислые и щелочные стоки. Кислые и щелочные воды можно попеременно пропускать через ионообменные смолы с карбоксильными группами.

14.2.2. ОБОГАЩЕНИЕ ВОДЫ СОЛЯМИ

Этот вид обработки применяют, когда необходимо ввести в очень мягкую воду некоторое количество бикарбоната кальция, т. е. повысить щелочность и жесткость воды, чтобы обеспечить образование защитного слоя карбоната кальция на незащищенной внутренней поверхности стальных или чугунных труб. Имеется несколько методов получения рекомендуемых значений общей щелочности и жесткости воды.

А. Диоксид углерода и известь или карбонат кальция применяют в большинстве случаев (при обработке осветленной воды для получения известкового раствора используют сатураторы). Для повышения общей щелочности на 1 мг-экв/л в 1 м³ воды необходимо ввести 44 г CO_2 и 28 г CaO.

Диоксид углерода может быть получен из выхлопных газов двигателя или из дымовых газов и очищен в скрубберах перед введением в обрабатываемую воду. Возможно также использование погружных горелок для сжигания жидкого или газообразного углеводорода, содержащегося в самой жидкости. Для получения 1 кг CO_2 необходимо 350 г кокса и 450 г топливной нефти. Товарная сжиженная углекислота характеризуется высокой степенью чистоты.

Введение извести может быть заменено фильтрованием через «Нютралайт», а потребление диоксида углерода таким образом снижено (до 25 г/м³ на 1 мг-экв/л щелочности).

Б. Бикарбонат натрия и соли кальция. Ионы HCO_3^- (в виде бикарбоната натрия) и ионы Ca^{2+} (в основном в виде хлорида кальция и иногда в виде сульфата кальция) вводят в воду одновременно.

Значение pH равновесного насыщения должно быть установлено с учетом новых значений ионной силы раствора.

Чтобы увеличить содержание бикарбоната кальция на 1 мг-экв/л в 1 м³ воды, следует ввести 84 г бикарбоната натрия вместе с 55,5 г хлорида кальция ($CaCl_2$) или с 68 г сульфата кальция ($CaSO_4$).

Эти методы обработки воды применяют на станциях малой и средней производительности.

В. Бикарбонат натрия и известь. При использовании метода Б может оказаться необходимым добавление извести, чтобы привести pH к значению равновесного насыщения в соответствии с новым солесодержанием воды.

Иногда жесткость воды достаточно высока и нужно только увеличить щелочность. В этом случае для повышения общей щелочности в воду добавляют бикарбонат натрия, а для регулирования pH — известь.

Г. Карбонат натрия и диоксид углерода. В зависимости от наличия местных реагентов общая щелочность воды может быть повышена комбинацией $Na_2CO_3+CO_2$. В этом случае расход CO_2 можно контролировать по заданному значению pH, а при достаточно высокой жесткости нет необходимости вводить другой реагент (в противном случае, как и по методу Б, добавляют соль кальция).

Д. Серная кислота и карбонат кальция. В отстойник или контактный резервуар вводят воду, дробленый мел и добавляют серную кислоту в количестве, эквивалентном заданному повышению щелочности. Можно также фильтровать воду через слой мрамора или известняка после введения того же количества серной кислоты.

Чтобы повысить щелочность воды на 1 мг-экв/л, в 1 м³ воды необходимо ввести 49,2 г H_2SO_4 и минимум 100 г $CaCO_3$. Процесс обработки воды следует закончить добавлением извести,

так как одного фильтрования через мрамор недостаточно для доведения pH до равновесного значения.

Е. «Нютралайт» и (или) «Минералайт». В некоторых случаях при обработке небольшого количества воды (например, при опреснении морской воды на кораблях, на морских буровых установках; при использовании небольших установок по опреснению методом обратного осмоса и т. д.) обработанную воду обогащают солями с помощью фильтрования в напорных фильтрах через «Нютралайт» или «Минералайт» (содержащий в основном безводный $CaSO_4$ — ангидрит), или через оба материала одновременно.

14.2.3. ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ ОТЛОЖЕНИЙ

В результате изменений показателей качества воды (pH, температуры, концентрации и т. д.) некоторые растворенные в воде вещества частично переходят в нерастворимые соединения, которые образуют твердые прочные отложения. Наиболее известный пример этого явления — осаждение карбоната кальция, механизм которого описан в гл. 2, с. 36.

До недавнего времени считали, что осаждение сульфата кальция и соединений магния происходит только в котлах и в опреснительных установках. Однако установлено, что осаждение этих соединений наблюдается и в воде охлаждающих систем при высоких значениях pH и больших концентрациях. С осаждением этих соединений можно столкнуться также в гидрометаллургии, при рафинировании сахара и т. д.

Для предотвращения образования отложений предложен ряд процессов: умягчения (с 324), декарбонизации с применением ионообменных смол (с. 325), декарбонизации с помощью извести (с. 149), подкисления, растворения карбонатов с помощью сильных кислот (с. 388).

Некоторые химические соединения способны оказывать двоякое воздействие на ионы металлов, особенно кальция и магния:

могут образовывать хорошо растворимые комплексы, которые обладают всеми свойствами солей натрия, а вода, обработанная такими соединениями, имеет все признаки умягченной воды. Для обработки воды по этому методу требуется около 250 г полифосфата на 1 г-экв кальция или 1000 г/м³ при жесткости воды 4 мг-экв/л;

при очень малых концентрациях могут замедлять зародышеобразование кристаллов и таким образом поддерживать раствор в состоянии пересыщения («пороговый эффект»). Из экономических соображений наиболее выгодно использовать этот вид воздействия химических соединений.

Самое широкое применение из упомянутых соединений нашли реагенты под общим названием «полифосфаты».

Ионы фосфорной кислоты склонны к конденсации и образованию линейных или циклических продуктов.

Полифосфаты $M_4P_2O_7 \cdot n(MPO_3)$ имеют линейную структуру. В группу солей натрия входят пирофосфат $Na_4P_2O_7$ и триполифосфаты $Na_4P_2O_7 \cdot NaPO_3$ или $Na_5P_3O_{10}$. Полиметафосфаты $(NaPO_3)$ n имеют циклическую структуру. Наиболее известны из этой группы соединений триметафосфат $(NaPO_3)_3$ и гексаметафосфат $(NaPO_3)_6$.

Товарные продукты часто представляют собой смеси, префикс в названии которых отражает среднюю степень конденсации.

Полифосфаты действуют очень эффективно при предотвращении отложений карбоната кальция и несколько менее эффективно по отношению к сульфатам кальция и магния.

Обычно для обработки воды с жесткостью и щелочностью порядка 4 мг-экв/л необходимо около 2 г/м³ полифосфатов. Доза полифосфатов возрастает с повышением жесткости, общей щелочности, мутности и температуры воды. Правилами высшего комитета Франции по гигиене для питьевой воды установлена максимально допустимая концентрация полифосфатов 5 г/м³ (по P_2O_5).

Полифосфаты поставляются в двух видах: кристаллические и стеклообразные. Кристаллические полифосфаты легко растворимы и вводятся в воду в виде раствора насосами-дозаторами. Применение их обеспечивает возможность очень точного дозирования. Стеклообразные полифосфаты растворяются очень медленно и переводятся в раствор путем фильтрования воды через реагент. Такой способ растворения фосфатов пригоден при обработке небольшого количества воды, но при этом трудно поддерживать постоянную дозу при переменном расходе.

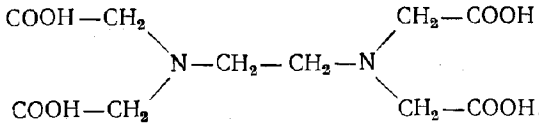
Полифосфаты имеют недостаток: они постепенно разлагаются в результате гидролиза, образуя ионы ортофосфата PO_4^{3-}. Скорость гидролиза возрастает с повышением температуры и кислотности среды, хотя нельзя точно указать порог, за которым происходит разрушение фосфатов. Их эффективность при температуре выше 60° С вызывает сомнение.

При высоких температурах снижается эффективность не только полифосфатов, но и ионов PO_4^{3-}, которые образуют отложения в форме малорастворимого ортофосфата кальция, что в свою очередь ведет к образованию отложений из смеси фосфата и карбоната кальция.

При повышенных температурах и жестких требованиях к стабилизации воды используются сложные органические вещества, поведение которых полностью идентично поведению полифосфатов.

Действие EDTA (этилендиаминтетрауксусная кислота) и ее натриевых солей не связано с «пороговым эффектом», они

используются в основном для обработки котловой воды, содержащей следы жесткости:

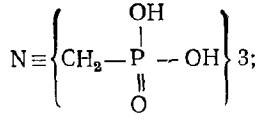


Обычно EDTA поставляют в виде 50%-ного раствора.

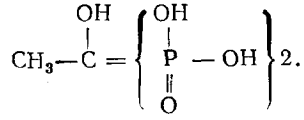
В настоящее время для обработки воды в охлаждающих системах широко используют органические производные фосфора и особенно фосфонаты.

Существуют два основных типа таких соединений:

AMP — трифосфонилметиламин



HEDP — оксиэтилидендифосфоновая кислота



Обычно их поставляют в виде концентрированных растворов. Они стабильны при температуре выше 100° С и чувствительны к присутствию свободного хлора. Хотя они и нетоксичны, их использование в питьевой воде должно быть одобрено компетентными органами.

Дозы этих соединений зависят от свойств воды и условий применения, а также от вида товарного продукта. В среднем дозы составляют около 1 г/м³ по P_2O_5 или около 10 г/м³ товарного продукта.

Если, несмотря на присутствие фосфатов, все-таки наблюдается незначительное выпадение в осадок из раствора карбоната кальция, образующийся в этих условиях осадок имеет хлопьевидную структуру и рост отложений не происходит.

Весьма спорно, стоит ли рекомендовать иногда применение полифосфатов, EDTA или органических соединений фосфора для стабилизации железосодержащих вод: в этом случае единственный надежный вид обработки воды — удаление железа.

Эти соединения препятствуют образованию кристаллической структуры, действуя и на молекулярном уровне, и на центры кристаллизации.

В трубах, охлаждающих системах и котлах образование отложений и кумулятивное осаждение могут быть также предотвращены применением диспергаторов, которые удерживают или переводят содержащиеся в воде твердые частицы в суспендированное состояние. В качестве диспергаторов для обработки воды в котлах низкого и среднего давления применяют таннины или, лучше, таннат натрия (см. с. 398), дозы 10 г/г-экв кальция.

Для защиты охлаждающих систем широко применялись лигносульфонаты и другие растительные экстракты, но в настоящее время отдают предпочтение синтетическим веществам таким, как полиакрилаты и полиакриламиды, частично гидролизованные с помощью производных сульфокислоты. Дозы и условия применения этих реагентов изменяются в широких пределах. При выборе реагентов рекомендуется учитывать технико-экономические показатели.

Чтобы обеспечить равномерное распределение, все эти реагенты обычно вводят воду в виде сильно разбавленных растворов, концентрацией несколько процентов. В процессе обработки воды в открытых контурах важно поддерживать постоянную дозу реагента при изменении расхода воды. Поэтому установка для дозирования должна по меньшей мере включать растворный бак, мешалку и дозатор.

14.2.4. ОБЕСКИСЛОРОЖИВАНИЕ

Для этой цели можно использовать три основных вещества: сульфит натрия с катализатором или без него, гидразин и таннат натрия. Скорость реакции каждого из этих реагентов возрастает с повышением температуры воды и pH.

Сульфит натрия действует в соответствии с реакцией:

$$2Na_2SO_3 + O_2 \rightarrow 2Na_2SO_4,$$

таким образом, стехиометрический расход безводного сульфита натрия на 1 г растворенного кислорода составляет 7,88 г.

При температуре выше 80° С скорость реакции сульфита натрия достаточно высока, но при низких температурах необходимо сульфит натрия вводить вместе с солью металла в качестве катализатора. При хранении в кристаллическом виде сульфит с добавкой катализатора должен быть защищен от попадания влаги, а при хранении в виде раствора — от контакта с воздухом.

На каждый 1 г восстановленного кислорода образуется около 9 г сульфата натрия; следовательно, общее солесодержание насыщенной воздухом холодной воды при обработке сульфитом увеличивается на 100 мг/л. Такое повышение солесодержания часто недопустимо для котлов среднего и высокого давлений, и нередко вызывает необходимость увеличивать продувку в котлах низкого давления.

Гидразин восстанавливает кислород по реакции:

$$N_2H_4 + O_2 \rightarrow 2H_2O + N_2$$

или стехиометрически 1 г N_2H_4 на 1 г кислорода. Гидразин обычно поставляется в виде гидразингидрата ($N_2H_4 \cdot H_2O$), содержащего 24% $N_2H_4 \cdot H_2O$ или 15% N_2H_4.

В холодной воде реакция идет очень медленно. При температуре 80° С необходимая доза все еще в несколько раз превышает стехиометрическое количество. Для ускорения этой реакции предложены каталитические методы.

Гидразин и продукты его разложения — летучие, таким образом этот метод не вызывает увеличения солесодержания котловой воды. При температурах выше 270° С, однако, следует учитывать образование продуктов разложения, особенно аммиака и азота.

Таннат натрия получают методом экстракции. В котловой воде 2 г танната натрия полностью восстанавливают 1 г кислорода. Скорости реакции сопоставимы со скоростями реакции гидразина. Продукты разложения почти все летучие. Применять таннаты, однако, не рекомендуется при давлении выше 3,5 МПа.

Таннат натрия способствует поддержанию в суспензии всех твердых частиц, он также образует защитную пленку на поверхности стали.

В котлах низкого и среднего давления после термической дегазации воды обычно рекомендуется поддерживать избыток 0,1—0,3 г/м³ N_2H_4 или 20—30 г/м³ сульфита натрия. По отношению к подпиточной воде это соответствует дозе 0,1 г/м³ N_2H_4 или 1 г/м³ N_2SO_3.

14.2.5. ИНГИБИТОРЫ КОРРОЗИИ

Рассмотрим основные химические вещества, которые добавляют в воду, чтобы исключить ее коррозионное воздействие на металл. Их также называют пассиваторами.

В отличие от подробно описанных методов, применение ингибиторов коррозии не действует на содержащиеся в воде химические соединения, а способствует образованию на металле тонкой защитной пленки, которая, исключая контакт между металлом и водой, предотвращает коррозию, обусловленную данным контактом. Для этой цели применяют большое число реагентов.

14.2.5.1. Простые ингибиторы.

Пленкообразующие ингибиторы. К ним относятся соединения, которые имеют сильное сродство к твердым поверхностям, на которых они адсорбируются. Находясь в воде в виде суспензии или очень слабого раствора, эти соединения покрывают стенки пленкой, похожей на покрытие краской.

Наиболее известные из этих веществ — пленкообразующие амины: жирные амины, содержащие 4—18 атомов углерода, в которых один конец молекулы гидрофильный, а другой гидрофобный. Располагаясь параллельно друг другу и перпендикулярно поверхности металла, молекулы образуют сплошную водонепроницаемую пленку, которая предотвращает контакт между водой и металлом и, таким образом, исключает какую-либо возможность возникновения коррозии. Дозы пленкообразующих ингибиторов составляют от 2 до 20 г/м³, однако их применение и необходимый аналитический контроль весьма трудоемки.

Применение аминов особенно рекомендуется для защиты трубопроводов возврата конденсата, когда выделяется большое количество CO_2, т. е. расход нейтрализующих аминов достаточно велик.

Когда применяемые конструкции систем мешают образованию сплошной пленки, не следует использовать пленкообразующие ингибиторы, поскольку все коррозионные токи будут концентрироваться на незащищенных участках поверхности, вызывая язвенную или даже сквозную коррозию.

Химические ингибиторы. Электрохимический механизм коррозии описан в гл. 2. Действие химических ингибиторов основано на использовании разности электрических потенциалов (коррозионные элементы) на металле. В результате образуется защитный слой или немедленно подавляется образование этих коррозионных элементов.

Одни ингибиторы действуют на анодные участки (хроматы), другие — на катодные участки (соли цинка), а некоторые на анодные и (или) катодные участки в зависимости от условий их применения (фосфаты). Действие ингибиторов заключается в изменении или потенциала, или поляризационных кривых электродов.

● *Полифосфаты* (см. с. 395). Из-за того, что стабильность этих соединений снижается с повышением температуры, область их применения ограничена системами, в которых максимальная температура на стенках не очень высока.

Полифосфаты обычно применяют для обработки вод, содержащих кислород, при pH порядка 6,5 дозами 5—50 г/м³; эти дозы повышают с увеличением жесткости воды. При торможении коррозии они оказывают двоякое действие.

● *Силикаты* обеспечивают защиту от коррозии обычной стали в мягкой и жесткой воде при дозах, не превышающих допустимые для питьевой воды (во Франции максимальная доза 10 г/м³ SiO_2). Силикаты поставляются в жидкой или стеклообразной форме.

● *Хроматы* являются анодными ингибиторами с высокой теплоустойчивостью, которые, однако, нельзя использовать для обработки питьевой воды. При использовании без дополнительных реагентов доза хроматов составляет несколько граммов на литр; в этом случае область их применения ограничена закрытыми контурами, в которых расход добавочной воды очень мал.

● *Нитриты* обеспечивают хорошую защиту стали от коррозии, но мало эффективны по отношению к сплавам меди и алюминию. Доза порядка 1 г/л.

14.2.5.2. Сложные ингибиторы. Часто возникает необходимость стабилизировать, усилить или дополнить действие ингибиторов коррозии с помощью других химических соединений типа буферных солей, катализаторов или диспергаторов. Товарные ингибиторы коррозии обычно представляют собой комбинации различных соединений. Комбинированное применение двух ингибиторов обеспечивает более эффективную защиту от коррозии, чем сумма эффектов при их раздельном применении: имеет место синергетический эффект. Это дает возможность значительно снизить необходимые дозы ингибиторов.

Сложные ингибиторы особенно эффективны для обработки воды в охлаждающих системах с открытыми градирнями, в которых потребление воды, а следовательно, и ингибитора велико. Для закрытых контуров, где количество добавочной воды мало, часто удобнее применять большие дозы ингибитора, так как это упрощает контроль.

Ингибиторы для закрытых циркуляционных контуров. Применяют ингибиторы двух видов: на основе буферных растворов хроматов и нитритов.

● *Ингибиторы на основе хроматов* обеспечивают высокую степень защиты для всех обычных металлов до температур порядка 150° С. Типичным ингибитором является RD8 — комплекс, который применяют дозами от 2 до 5 г/л, возрастающими с повышением концентрации хлоридов. В таких системах следует использовать обессоленную, умягченную воду или, в крайнем случае, воду с низкой жесткостью. Хроматы нельзя применять совместно с антифризами.

● *Ингибиторы на основе нитритов* обеспечивают эффективную защиту от коррозии стали и чугуна. Они обычно содержат вещества, которые защищают медь и алюминий. Эти ингибиторы совместимы с антифризами. Типичный ингибитор данного типа RD11 — комплекс. Необходимая доза 2—20 г/л в обессоленной и умягченной воде или, в худшем случае, в воде с низкой жесткостью.

Ингибиторы для полузакрытых контуров. Поскольку невозможно привести исчерпывающий список, классифицируем эти ингибиторы по их основным составляющим (добавки могут изменяться в различных товарных продуктах).

● Хромат-фосфатные. По внешнему виду представляют собой желтый порошок. Необходимые дозы от 30 до 80 г/м^3 товарного продукта или от 15 до 40 г/м^3 по CrO_4. Значение pH воды около 6,5. Хромат-фосфатные ингибиторы обеспечивают эффективную защиту от коррозии, но обладают описанными ниже недостатками хроматов и фосфатов.

● Фосфаты цинка (тип Z106) также очень эффективны, особенно в мягких водах, содержащих хлориды. По внешнему виду представляют собой белый порошок. Необходимые дозы от 12 до 60 г/м^3. Значение pH воды 6,5—7. Достоинства фосфатов цинка: продувка системы обычно не вызывает проблем, связанных с токсичным действием ингибиторов.

Недостатки: как и для всех полифосфатов скорость гидролиза возрастает с повышением температуры.

Их применение связано с введением в систему легко усваиваемого фосфора, который способствует развитию водорослей и бактерий.

● Хроматы цинка обеспечивают очень эффективную защиту от коррозии стали и всех обычных металлов. По внешнему виду представляют собой желтый порошок. Необходимые дозы: от 25 до 40 г/м^3 или 6—10 г/м^3 по CrO_4. Значение pH воды 6,4—6,8.

Достоинство хроматов цинка состоит в том, что они замедляют развитие водорослей и бактерий и экономичны. Их недостаток — непосредственный сброс продувочной воды из системы невозможен.

● Цинк-органические соединения — это различные органические соединения, но главным образом те, в молекулу которых включен фосфор.

Характеристика реагентов: жидкие, кислые. Необходимые дозы: 30—100 г/м^3. Значение pH воды 6,5—8,5. Достоинство *цинк-органических соединений* состоит в том, что они обладают высокой устойчивостью при повышенных температурах. Не возникает проблем, связанных с токсичностью, при продувке систем.

Однако они имеют несколько меньшую эффективность и несколько бóльшую стоимость.

Ингибиторы для распределительных систем. Даже для защиты производственных систем распределения воды список ингибиторов может быть значительно сокращен двумя следующими требованиями:

● ингибиторы не должны содержать токсичных веществ;

● они должны быть эффективны при дозах, достаточно низких, чтобы их применение было экономически оправданным.

Для питьевой воды (горячей или холодной) на применение ингибиторов должно быть получено разрешение.

В настоящее время можно использовать только некоторые соединения типа фосфата цинка; допускаемые дозы 10—20 г/м^3.

14.2.6. ПРИМЕНЕНИЕ РАЗЛИЧНЫХ РЕАГЕНТОВ

14.2.6.1. Биоцидные реагенты. Рассмотрим все вещества, которые предотвращают рост водорослей, плесеней, бактерий и даже ракообразных и насекомых и т. д. Область применения

этих реагентов ограничена промышленными системами водоснабжения, особенно охлаждающими.

Не рассматривая наиболее токсичные вещества, особенно соединения тяжелых металлов, назовем следующие биоцидные реагенты: хлор и его неорганические производные (см. с. 403), четвертичные аммониевые соединения, органические производные серы. В зависимости от свойств реагента и предполагаемого использования дозы изменяются от 1 до 100 г/м^3.

В случае обработки воды биоцидными реагентами выбрать правильный способ их применения не менее важно, чем выбрать реагент. Прежде всего необходимо учитывать явление привыкания, т. е. способность некоторых представителей вида выживать в присутствии биоцидного реагента и постепенно развиваться, образуя резистентные штаммы. Чтобы предотвратить это явление, не следует применять биоцидные реагенты непрерывно, а лучше проводить «шоковую» или «ударную» обработку, изменяя ее периодичность с одного раза в сутки до одного раза каждые три месяца. Также не следует использовать все время один и тот же биоцидный реагент.

Очень серьезное внимание должно уделяться установлению влияния биоцидных реагентов на окружающую среду.

Большинство систем нельзя считать полностью закрытыми, так как они имеют выпуски в канализацию или водоемы.

Биоцидные реагенты обычно стабильны, а методы разложения их еще не получили достаточно широкого распространения. Поэтому во многих случаях следует применять постоянную обработку хлором, перемежающуюся или дополняемую использованием биоцидных реагентов.

В заключение следует отметить, что все методы борьбы с биологическими обрастаниями значительно более эффективны и дешевы, чем прочистка и замена труб.

14.2.6.2. Реагенты для очистки труб. Рассмотрим многочисленные вещества и композиции, которые применяют, в частности, для поддержания или восстановления чистоты охлаждающих систем с открытыми градирнями.

Биоцидные реагенты, описанные выше, часто оказывают очищающее действие, особенно четвертичные аммониевые соединения благодаря их моющему действию. Диспергаторы обладают свойством поддерживать в воде в суспендированном виде частицы, которые иначе образуют отложения в системе. Не приводя исчерпывающего списка, отметим следующие из них: таннаты и лигносульфонаты, эффективность которых хорошо известна, а также полиакрилаты и полиакриламиды, широко применяемые органические полимеры со средней молекулярной массой.

Знание условий применения так же важно, как самих реагентов. Во-первых, лучше поддерживать систему чистой с начала ее эксплуатации, чем очищать ее потом. Во-вторых, хотя

диспергаторы поддерживают частицы в суспензии, рано или поздно наступает момент, когда взвешенные частицы должны быть удалены из системы. Отсюда вытекают преимущества комбинированного действия диспергаторов с байпасным фильтрованием части потока.

Хотя необходимые дозы при непрерывной обработке составляют около 5—10 г/м^3, они могут достигать 200—300 и даже 500 г/м^3 при очистке системы. Там, где это возможно, лучше относить расход диспергаторов к массе твердых частиц, которые следует перевести обратно во взвешенное состояние или, по меньшей мере, к площади поверхности очищаемого металла.

15. ОКИСЛЕНИЕ И ДЕЗИНФЕКЦИЯ

С целью удаления из воды некоторых нежелательных растворенных неорганических примесей (например, соединений железа и марганца), устранения привкуса и запаха, а также уничтожения патогенных микроорганизмов ее обрабатывают, используя химические (окисление) и физические (ультрафиолетовое облучение) методы.

В настоящей главе окислительные агенты описываются с точки зрения условий их применения (хлор и его производные, озон и бром) и получения (диоксид хлора, озон). В каких схемах обработки и каким образом используют эти окислители и дезинфектанты, описано в гл. 20, в которой подробно рассмотрены процессы очистки воды различного происхождения.

15.1. ОКИСЛЕНИЕ И ДЕЗИНФЕКЦИЯ ХЛОРОМ

15.1.1. ДЕЙСТВИЕ ХЛОРА

Хлор — реагент, наиболее широко используемый для дезинфекции воды. Он обладает весьма значительной остаточной окислительной способностью и может быть применен для окисления органических веществ. Его летальное воздействие на бактерии объясняется деструкцией ферментов, необходимых для жизнедеятельности патогенных микроорганизмов.

При растворении в воде хлор реагирует с ней согласно уравнению

$$Cl_2 + H_2O \leftrightarrows HClO + HCl.$$

Одновременно протекает вторичная реакция

$$HClO \rightleftarrows ClO^- + H^+.$$

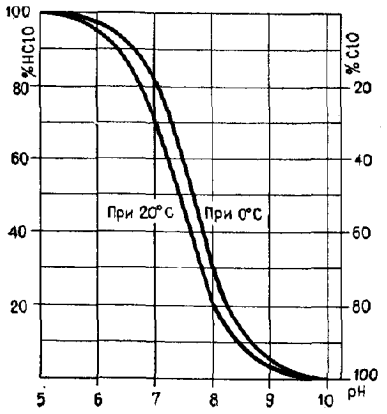


Рис. 15.1

Направление этих равновесных реакций зависит от значения pH среды. Если pH<2, весь хлор находится в молекулярной форме. При pH=5 молекулярный хлор совершенно исчезает, превращаясь в хлорноватистую кислоту. При pH=10 хлор переходит в форму гипохлорит-иона (ClO^-).

В интервале значений pH от 5 до 10, что обычно соответствует условиям хлорирования воды, в среде присутствует смесь хлорноватистой кислоты и гипохлорит-ионов. Соотношение между ними зависит от значения pH (см. кривую на рис. 15.1).

Так как хлорноватистая кислота обладает наибольшим бактерицидным действием, хлор более эффективен в кислой среде, чем в щелочной. Эффективность хлора возрастает при увеличении времени контакта его с водой. Короткое время контакта может быть компенсировано увеличением дозы реагента.

15.1.2. ПРИМЕНЕНИЕ ХЛОРА

В практике обработки воды хлор и его производные широко используются для предварительного хлорирования, дезинфекции питьевой воды, предотвращения роста водорослей и моллюсков в охлаждающей оборотной воде и для окончательной обработки городских сточных вод.

15.1.2.1. Предварительное хлорирование (точка перелома). Если увеличить дозы хлора, вводимого в воду, и через каждый час замерять концентрацию остаточного хлора, нередко обнаруживается, что, несмотря на постоянное увеличение дозы введенного хлора, остаточная его концентрация сначала возрастает, достигая максимума, затем уменьшается до минимума, после чего начинает увеличиваться, как это показано на кривой на рис. 15.2. Это происходит потому, что на первой стадии процесса хлор реагирует с органическими веществами и с аммонийным азотом, присутствующим в воде в свободном состоянии или в виде аминов, образуя хлорные соединения (хлорамины), которые на второй стадии разрушаются при повышении концентрации хлора. Критическая точка, или «точка перелома», достигается тогда, когда количество введенного хлора соответствует точке минимума *m*; после этой точки в воде содержится только свободный хлор и следы хлораминов.

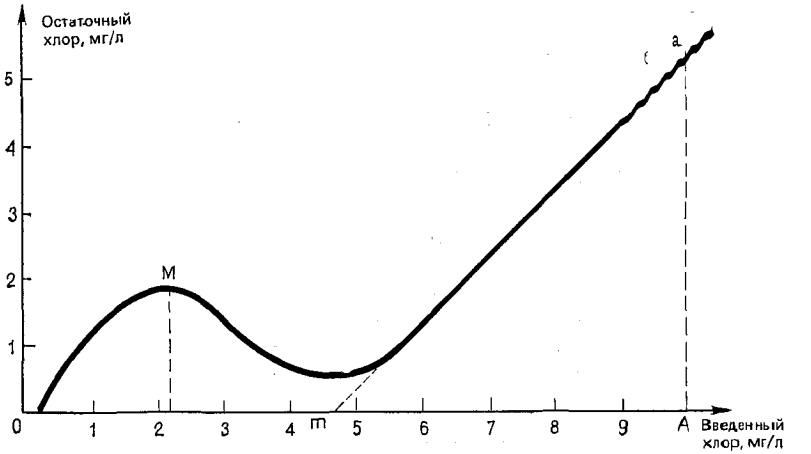


Рис. 15.2

Появление в воде хлорсодержащих веществ — одна из основных причин неприятного привкуса воды. Точка перелома соответствует той необходимой дозе хлора, при которой привкус минимален и достигается максимальный эффект по обесцвечиванию воды.

При хлорировании некоторых видов вод точка перелома не наблюдается.

Контроль процесса предварительного хлорирования осуществляется путем определения концентрации свободного хлора в воде. Определению не должно мешать присутствие в воде связанного хлора в виде хлораминов. В лабораторных условиях с этой целью применяют амперометрическое титрование. В условиях производства контроль ведется с помощью автоматического фотоколориметра, описанного на с. 584, при этом используется сирингальдазин как специфический реагент на свободный хлор.

Быструю проверку вручную можно провести с помощью компаратора с окрашенными экранами.

15.1.2.2. Дезинфекция питьевой воды. Вода, предназначенная для потребления населением, не должна содержать гнилостных и патогенных бактерий. Дезинфекция достигается путем инжекции хлорной воды; при этом хлорную воду вводят либо в резервуар чистой воды, либо в трубопровод, подающий воду в накопительный резервуар, если он работает как напорный. В обоих случаях обеспечивается эффективное смешивание хлорного раствора и обрабатываемой воды. Необходимое время контакта — не менее 30 мин, после чего концентрация остаточного хлора должна составлять 0,1—0,2 мг/л.

Ориентировочно необходимая доза хлора должна обеспечить наличие следов свободного остаточного хлора после 30 мин контакта. Определение необходимой дозы проводится введением повышающихся доз хлора в серию склянок объемом 1 л, содержащих обрабатываемую воду. Остаточный свободный хлор определяют после 30 мин контакта при заданной температуре.

Контроль процесса обеззараживания обеспечивается бактериологическими тестами достаточно в полной мере. Тем не менее должны выполняться частые замеры остаточного хлора. При этом желательно использовать метод анализа, позволяющий определять концентрацию как свободного, так и связанного хлора (см. «Методы анализа», с. 988).

Если доза хлора, вводимого в дезинфицируемую воду, меньше дозы, соответствующей точке перелома, необходимо использовать один из вышеупомянутых методов замера с тем, чтобы определить свободный хлор отдельно от хлора, связанного в хлорамины. Избыток хлора может быть замерен автоматически с помощью гальванометра или фотоколориметра (см. с. 584).

15.1.2.3. Контроль расхода газообразного хлора и хранение жидкого хлора. Классические аппараты для дозирования газообразного хлора (см. с. 562) основаны на обычных принципах распределения газов. Оборудование состоит из испарителя, регулятора расхода, расходомера и узла растворения хлора. В целях безопасности оно работает под частичным вакуумом. Давление в камере, расположенной непосредственно после впускного клапана, снижающего давление сжатого газа, несколько ниже атмосферного давления. Даже при условии работы оборудования под вакуумом всегда есть опасность утечки, так как хлор вводится под давлением.

Для предотвращения коррозии смежного оборудования (электромоторов, распределительных устройств) оборудование для хранения и распределения хлора должно быть расположено в отдельном помещении и установлено в соответствии с инструкцией.

Рекомендации по методике монтажа оборудования приведены в гл. 18.

Хлор — сильнодействующий раздражитель дыхательных путей; его присутствие в воздухе ощущается при концентрации значительно ниже опасного уровня. В закрытом помещении низкие концентрации хлора вызывают иногда тошноту и кашель.

На случай аварии должны быть предусмотрены специальные меры безопасности. Соответствующие газовые маски со специальными фильтрующими патронами следует хранить в легко доступном месте, в пределах досягаемости, но вне территории, которая может подвергнуться опасности при несчастном случае.

С учетом токсичности хлора различные физиологические реакции в организме человека вызываются следующими концентрациями хлора в воздухе, мг/л:

Допустимая безвредная концентрация хлора в воздухе для дыхания в течение 8 ч работы	1
Ощутимый запах	3,5
Раздражение в горле	15
Вызывает кашель	30
Максимальная концентрация для короткого периода экспозиции	40
Опасная при короткой экспозиции	40—60
Смертельная	1000

15.2. ОКИСЛЕНИЕ И ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЕ ПРОИЗВОДНЫМИ ХЛОРА

15.2.1. ХЛОРАМИНЫ

Существуют очень стойкие антисептики, действующие более медленно, чем хлор, но дольше сохраняющие активность в воде. Обычно их готовят из хлора и аммиака (соотношение аммиак : хлор = (0,25÷0,5) : 1 или из аммонийных солей. В настоящее время хлорамины не находят широкого применения.

15.2.2. ДИОКСИД ХЛОРА

Это — желтый газ с резким раздражающим запахом. При концентрации в воздухе более 10% (по объему) он взрывается, но совершенно безопасен в водном растворе. Диоксид хлора — высокоэффективный окислитель с сильными дезодорирующими и отбеливающими свойствами. Его действие на патогенные микроорганизмы, по крайней мере, равно действию хлора.

Этот газ целесообразно использовать вместо хлора в том случае, когда обрабатываемая вода содержит следы фенола, который, соединяясь с хлором, придает воде неприятный хлорфенольный запах. Диоксид хлора быстро окисляет соли железа, превращая их в нерастворимый гидроксид железа. Подобным образом он осаждает соли марганца в виде его диоксида при условии избыточной концентрации ClO_2, которая зависит от значения pH. Таким образом, применение диоксида хлора на стадии предварительного хлорирования позволяет удалить из воды эти металлы.

Диоксид хлора всегда получают на месте реакцией хлора или раствора соляной кислоты с хлоритом натрия.

В твердом состоянии с хлоритом натрия следует обращаться осторожно, хранить в сухом, холодном месте, отдельно от горючих материалов.

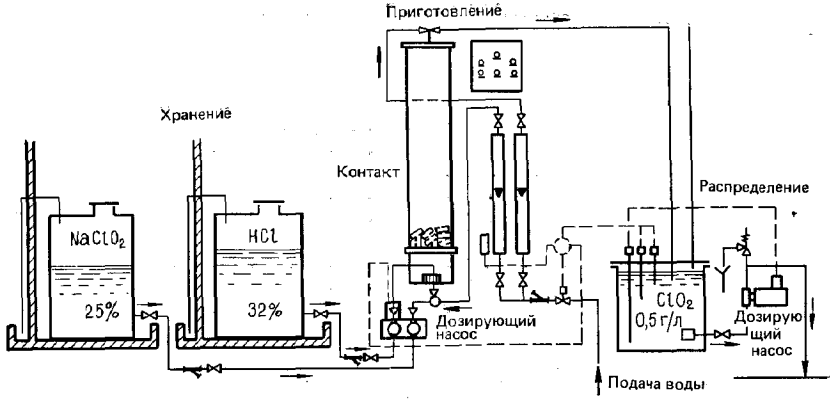


Рис. 15.3. Схема установки для получения диоксида хлора из соляной кислоты

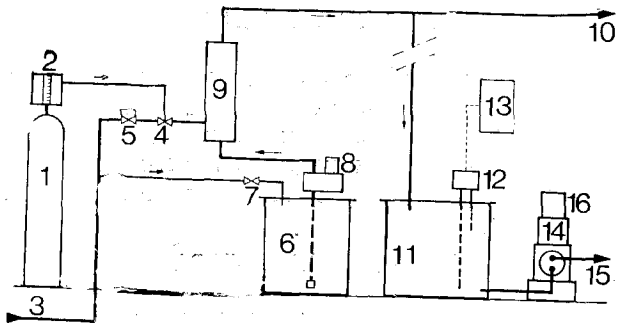


Рис. 15.4. Схема установки для получения диоксида хлора из хлора

1 — баллон с хлором; *2* — хлоратор; *3* — магистральный водопровод; *4* — эжектор; *5* — электромагнитная задвижка; *6* — емкость для приготовления хлорита; *7* — вода для разбавления; *8* — дозирующий насос; *9* — камера реакции; *10* — подача раствора диоксида хлора с постоянной скоростью; *11* — емкость для хранения раствора диоксида хлора; *12* — датчик уровня; *13* — блок электрического управления работой хлоратора и дозирующего насоса; *14* — насос, подающий раствор диоксида хлора; *15* — подача раствора с переменной скоростью; *16* — блок управления отключением насоса и изменением его производительности

Приготовление из соляной кислоты. Реакция образования диоксида хлора сложная, но может быть выражена в общем виде как

$$5NaClO_2 + 4HCl \rightarrow 4ClO_2 + 5NaCl + 2H_2O.$$

Для получения 6 г диоксида хлора требуется 10 г чистого хлорита натрия и 3,2 г соляной кислоты. Реакция протекает медленно и идет до конца только в присутствии избытка кислоты. На практике расхода кислоты в 3—4 раза превышает требуемый по стехиометрии.

Установка для получения диоксида хлора с замером и дозированием реагентов может быть выполнена по схеме, представленной на рис. 15.3.

Растворы соляной кислоты и гипохлорита натрия с концентрацией соответственно 8,5 и 7% готовят в отдельных емкостях. Двойным дозирующим насосом растворы реагентов подают в сосуд-смеситель, рассчитанный на 20-мин контакт смеси при условии, что насос работает на полную мощность. При одинаковой скорости подачи реагентов на выходе из смесителя получается раствор, содержащий 20 г/л диоксида хлора.

Приготовление из хлора. В этом случае реакция имеет вид

$$2NaClO_2 + Cl_2 \rightarrow 2ClO_2 + 2NaCl.$$

10 г чистого хлорита натрия реагируют с 3,9 г газообразного хлора с образованием 7,45 г диоксида хлора (рис. 15.4).

Раствор хлора в воде с pH<2,5 смешивается с необходимым объемом 10%-ного раствора хлорита натрия. Чтобы предотвратить попадание непрореагировавшего хлорита натрия в обрабатываемую воду, смесь никогда не готовят по стехиометрическому соотношению, а хлор всегда подается с большим избытком. Расход хлора можно снизить, понижая pH реагирующей смеси до значения <2 введением серной кислоты, но это усложняет схему.

15.2.3. ГИПОХЛОРИТ НАТРИЯ

Раствор гипохлорита натрия, называемый также «жавелевой водой» или хлорной известью, характеризуется содержанием в нем активного хлора, измеряемого в хлорометрических градусах. Это количество свободного хлора в литрах, которое при нормальных условиях (0° С, 0,1 МПа) имеет ту же самую окислительную способность, что и 1 кг продукта.

1 хлорометрический градус = 3,17 г Cl_2 на 1 кг продукта.

Для обеззараживания воды в нее добавляют товарный концентрированный раствор гипохлорита натрия. Если необходимый объем реагента чрезвычайно мал, продажный раствор гипохлорита предварительно разбавляют.

В процессе приготовления щелочного раствора гипохлорита натрия из разбавляющей воды могут выпадать соли жесткости, что приводит к образованию накипи в трубах и оборудовании. Предотвратить это нежелательное явление можно либо приготовлением раствора за 24 ч до использования, чтобы обеспечить достаточное время отстаивания, либо добавлением в емкость для приготовления раствора перед каждым ее наполнением около 50 г гексаметафосфата натрия на 100 л воды.

Расход раствора гипохлорита натрия можно легко замерить с помощью простейшего дозатора модели DRC (см. описание на с. 552), который представляет собой устройство, позволяющее осуществить поверхностный отвод дезинфицирующего раствора, подаваемого в систему непрерывно, либо с постоянной скоро-

стью, либо пропорционально расходу обрабатываемой воды, если последний колеблется.

Если дезинфицирующий раствор должен подаваться с постоянной или переменной скоростью в напорный трубопровод, обычно используют насос-дозатор (описанный на с. 550), позволяющий осуществить инжекцию под давлением.

Контроль процесса обеззараживания осуществляется так же, как и при обработке газообразным хлором по наличию в обработанной воде остаточного количества реагента (не считая бактериологических тестов). Если для обеззараживания применяют диоксид хлора, полученный из хлора, в обработанной воде определяют остаточный Cl_2 (см. методики анализов, с. 988).

15.3. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ХЛОРИРОВАНИЕ

15.3.1. ПРИНЦИП МЕТОДА

При электрохимическом хлорировании гипохлорит натрия получают на месте электролизом раствора поваренной соли. Применение этого метода особенно заманчиво в том случае, когда в качестве солевого раствора доступно использование морской воды. Электрохимическое хлорирование не требует специальных мер по обеспечению безопасности, как при хранении больших количеств жидкого хлора. При этом нет необходимости в больших емкостях для хранения реагентов, поскольку получают гипохлорит натрия в соответствии с потребностью. Даже при искусственном приготовлении исходного раствора из поваренной соли значительно упрощается проблема перевозки и обработки реагента вследствие его безопасности.

При электролизе раствора хлорида натрия происходят следующие реакции:

на катоде

$$2Na^+ + 2e^- \rightarrow 2Na;$$

$$2Na + 2H_2O \rightarrow 2NaOH + H_2;$$

на аноде

$$2Cl^- - 2e^- \rightarrow Cl_2;$$

$$Cl_2 + H_2O \rightarrow HClO + HCl.$$

Получающийся в результате реакции гидроксид натрия реагирует с соляной и хлорноватистой кислотами, образуя соответственно хлорид и гипохлорит натрия. Суммарную реакцию можно записать следующим образом:

$$2NaCl + 3H_2O \rightarrow NaClO + NaCl + 2H_2O + H_2\uparrow.$$

Согласно реакции I г хлора эквивалентны 2,1 г гипохлорита натрия, для получения которых требуется 3,3 г поваренной соли. При этом выделяется 0,056 г водорода.

15.3.2. КОНСТРУКЦИЯ ЭЛЕКТРОЛИЗЕРА

Электролизер представляет собой резервуар с впускным и выпускным устройствами, изготовленный из пластмассы, невосприимчивой к действию гипохлорита натрия. Перед выпуском предусмотрено удаление выделившегося водорода.

Внутри резервуара последовательно установлены электроды, которые на концах присоединены соответственно к отрицательному (катод) и положительному (анод) полюсам генератора тока. Электроды обычно делают из титана; анод, так же как анодную поверхность промежуточных биполярных электродов, покрывают платиной для защиты от коррозии.

15.3.3. УСЛОВИЯ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Электролизеры устанавливают последовательно или параллельно в зависимости от качества электролита и желаемой концентрации раствора гипохлорита натрия. В обоих случаях возможна рециркуляция солевого раствора.

Используя раствор оптимальной концентрации, т. е. около 30 г/л NaCl, получают концентрацию гипохлорита натрия, эквивалентную 250 мг/л хлора при одном пассаже раствора через электролизер.

При последовательном расположении электролизеров и рециркуляции солевого раствора эта концентрация может быть повышена до 3 г/л, если исходным раствором являлась морская вода, и до 6—8 г/л в случае применения искусственно приготовленного раствора поваренной соли.

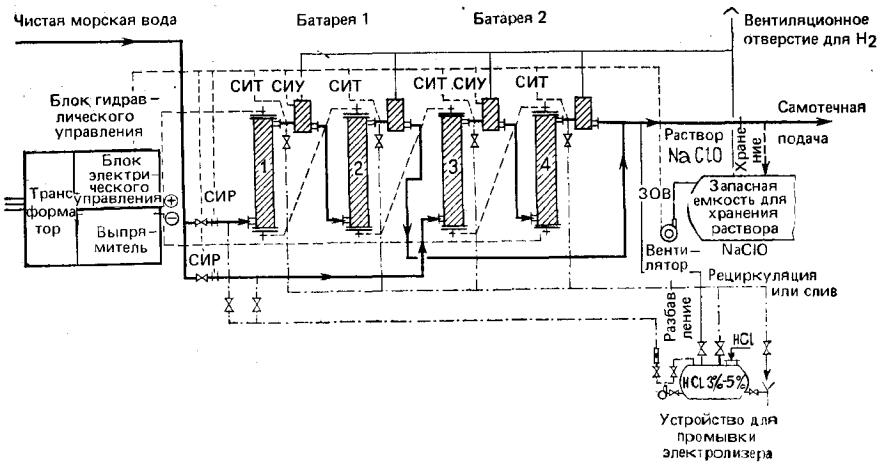


Рис. 15.5. Схема установки для получения гипохлорита натрия из обычной морской воды

СИР — сигнальный индикатор расхода; СИТ — сигнальный индикатор температуры; СИУ — сигнальный индикатор уровня; ЗОВ — защита на случай остановки вентилятора

Для дезинфекции питьевой воды рекомендуется применять растворы с высокой концентрацией, чтобы по возможности снизить количество хлорида натрия, добавляемого в питьевую воду.

Расход электроэнергии составляет 4—4,5 кВт·ч на 1 кг эквивалентного хлора.

15.4. ОКИСЛЕНИЕ И ДЕЗИНФЕКЦИЯ ОЗОНОМ

15.4.1. СВОЙСТВА И ПОЛУЧЕНИЕ ОЗОНА

15.4.1.1. Физические свойства. Озон — аллотропная модификация кислорода с формулой O_3. Он представляет собой газ голубоватого цвета и обладает следующими основными свойствами: молекулярная масса 48 г/моль; относительная плотность (воздух-I) 1,657; плотность (при 0° С и давлении 0,1 МПа) 2,143 кг/м^3; теплота образования при постоянном объеме 143 кДж/моль.

15.4.1.2. Принцип получения озона. Озон — нестабильный газ, образующийся в результате ионизирующего действия на кислород электрического поля с высоким потенциалом; видимый результат этого действия — фиолетовый разряд. В промышленных условиях озон получают пропусканием потока воздуха или кислорода между двумя электродами, к которым приложена разность потенциалов. Чтобы избежать образования дуги, один, а иногда оба электрода, покрывают слоем диэлектрика одинаковой толщины, образующим эквипотенциальную поверхность.

Разность потенциалов, подведенная к электродам, очевидно, зависит от типа и толщины слоя диэлектрика и ширины ионизационного зазора; практически она обычно составляет от 10 до 20 кВ. При определенной разности потенциалов выход озона зависит, главным образом, от геометрической формы элементов озонатора, диэлектрических свойств изолятора, частоты тока, влажности воздуха, давления и желаемой концентрации озона в воздухе или кислороде, а также от температуры охлаждающей воды в озонаторе.

Обычно концентрация озона в озоновоздушной смеси в среднем составляет 10—20 г/м^3. При такой концентрации и при условии интенсивной сушки воздуха (точка росы между температурами 40 и 60° С) производительность существующих на сегодняшний день озонаторов в зависимости от их типа составляет 50—100 г/ч на 1 м^2 поверхности; производительность может быть повышена путем увеличения частоты тока.

В зависимости от размера озонатора потребление энергии всей установкой колеблется от 20 до 30 Вт·ч на 1 г образовавшегося озона. Собственно озонатор потребляет от 14 до 18 Вт·ч на 1 г озона.

Вследствие потерь при электрическом разряде значительная часть энергии превращается в тепло, что существенно повышает температуру. Так как выход озона снижается при повышении температуры газа, необходимо обеспечить охлаждение системы, которое, как правило, осуществляется циркуляцией охлаждающей воды.

15.4.1.3. Типы озонаторов. В настоящее время существуют два типа установок, пригодных для получения озона: пластинчатые и трубчатые озонаторы.

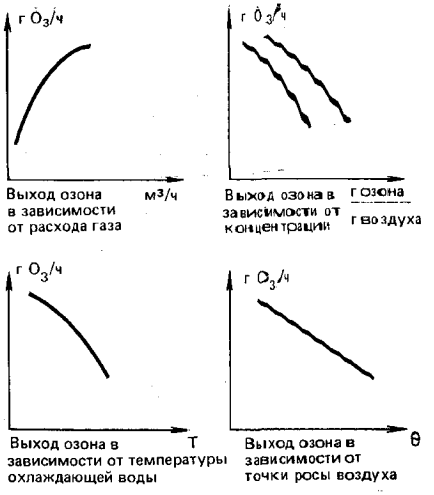


Рис. 15.6.

Озонаторы пластинчатого типа состоят из плоских диэлектриков и металлических электродов. Установку, как правило, размещают в изолированном помещении, в состав ее входит охлаждающая система.

Озонаторы трубчатого типа состоят из двух концентрических электродов и диэлектрической трубки. Трубчатые озонаторы различают по горизонтальному или вертикальному расположению электродов и положению диэлектрика относительно охлаждающей системы.

● Вертикальные трубчатые озонаторы обычно состоят из двух концентрических электродов: пустотелый металлический цилиндр внутри, а снаружи трубчатый диэлектрик, закрытый у нижнего торца. Металлический электрод, через который вводится ионизируемый газ, соединен с клеммой высоковольтного трансформатора. Диэлектрическая трубка непосредственно погружена в охлаждающую воду, которая при заземлении действует как второй электрод. Озон образуется в свободном пространстве между наружной поверхностью металлического электрода и внутренней стороной диэлектрической трубки.

● В горизонтальном трубчатом озонаторе фирмы «Дегремон» каждый элемент представляет собой трубку из нержавеющей стали, погруженную в охлаждающую воду и заземленную. Другой электрод представляет собой металлическую оболочку, вложенную внутрь диэлектрической трубки, закрытой с одного конца. Этот электрод подсоединен к клемме высоковольтного трансформатора. Принцип устройства, таким образом, противоположен принятому в трубчатых озонаторах вертикального

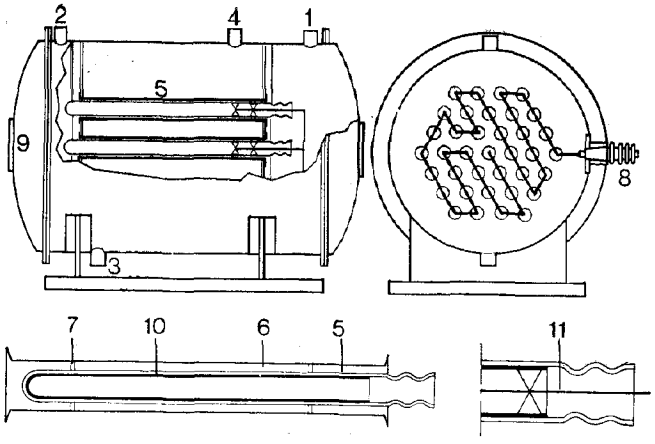


Рис. 15.7. Схема горизонтального трубчатого озонатора фирмы Дегремон

1 — впуск воздуха; *2* — выпуск озонированного воздуха; *3* — впуск охлаждающей воды; *4* — выпуск охлаждающей воды; *5* — диэлектрическая трубка; *6* — зона тихого разряда; *7* — трубка — держатель; *8* — ввод высокого напряжения; *9* — боковой люк; *10* — металлический электрод; *11* — контактная щетка

типа, так как в этом случае внутренняя поверхность диэлектрической трубки не является земным электродом, а к ней подведено высокое напряжение. Озон образуется в свободном пространстве между внешней поверхностью диэлектрической трубки и внутренней поверхностью металлической трубки, действующей как земной электрод.

Центрирование диэлектрической трубки внутри металлической производится с помощью пружин из нержавеющей стали. Между ними нет жесткой связи, потому диэлектрик ее подвержен механическим нагрузкам в результате температурных изменений.

Каждая трубка может быть снабжена индивидуальным плавким предохранителем, обеспечивающим отключение неисправной трубки, в то время как остальные диэлектрики продолжают работать.

Установка работает одинаково хорошо при разрежении и под давлением, поскольку удельная производительность мало зависит от давления, пока концентрация озона остается низкой.

15.4.1.4. Технология получения озона. В озонатор можно подавать воздух или кислород, выбор зависит от предполагаемого применения и доступности чистого кислорода.

Для одного и того же озонатора, при условии подведения той же мощности, кислород, как исходный материал, позволяет получить вдвое больше озона, чем воздух. Использование кислорода, таким образом, позволяет достичь существенного снижения стоимости установки и расхода электроэнергии. Несмотря на это, озон в большинстве случаев получают из воздуха.

Есть несколько причин, по которым воздух, подаваемый в озонатор, необходимо полностью кондиционировать и осушать:

на выходе озона отрицательно сказывается наличие пыли в воздухе; она обусловливает образование электрической дуги, на что непроизводительно расходуется энергия, и ухудшение вследствие этого качества материалов;

водяные пары, содержащиеся в воздухе, увеличивая электрическую проводимость газовой среды, также способствуют образованию дуги. Более того, часть потребляемой энергии расходуется на ионизацию водяных паров, в результате чего снижается выход озона;

наконец, в присутствии воды оксиды азота, образующиеся при электрическом разряде, дают начало азотистым производным, которые загрязняют оборудование, мешают процессу и нежелательны в питьевой воде.

Компрессия воздуха. Давление, при котором воздух подается в озонатор, зависит от метода введения озона в обрабатываемую воду и способа осушения воздуха.

Если воздух осушают в тепловой регенерируемой сушилке при низком давлении методом, который описан ниже, давление на входе складывается из давления, необходимого для эффективного контакта озона с водой, и потерь давления в различных частях оборудования и в трубопроводе. Давление на входе составляет около 0,07 МПа и в этом случае обеспечивается воздуходувкой.

Если воздух осушают в бестепловых регенерируемых сушилках высокого давления, давление на входе изменяется в пределах 0,5 МПа — 1 МПа.

Осушение воздуха обычно проводится в одну стадию при высоком давлении и в две при низком давлении.

● При одностадийной сушке в бестепловых сушилках сжатый воздух, предварительно охлажденный водой, циркулирующей в теплообменнике, проходит в сушилку с каким-нибудь адсорбентом, например, активированным оксидом алюминия. Установка состоит из двух сушилок, одна из которых подвергается регенерации, в то время как в другой осушается воздух.

Бестепловая регенерация адсорбента не требует подвода тепла извне. Так как адсорбция — явление экзотермическое, тепло сухого воздуха может быть использовано для десорбции фиксированной воды в колонне, подвергающейся регенерации. Количество сухого воздуха, расходуемое на регенерацию, эквивалентно 12—25% общего расхода воздуха, вводимого в сушилку. Соотношение изменяется в зависимости от мощности оборудования и давления на входе.

● Двухстадийная сушка при низком давлении — предпочтительный метод сушки для установок большой мощности. Воздух сначала поступает в холодильник (первая стадия), где бо́льшая часть водяных паров конденсируется, и выходит из него с температурой от 2 до 5° С в состоянии, близком к насыщению. Затем воздух поступает в сушилку (вторая стадия), которая

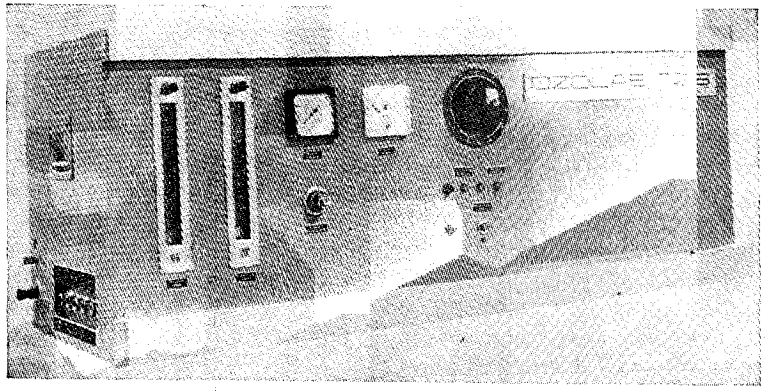


Рис. 15.8. Лабораторный озонатор типа ОЗОЛАБ T2S

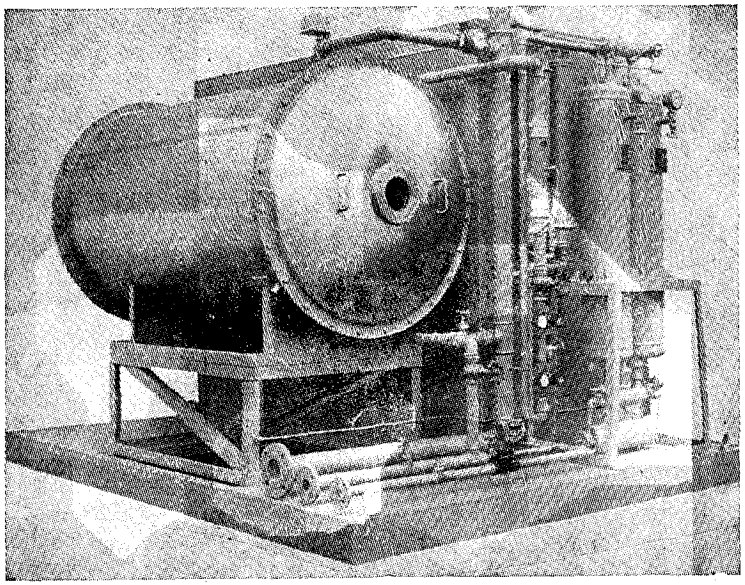


Рис. 15.9. Моноблочный озонатор типа МВ

содержит адсорбент, подобный оксиду алюминия. Эта сушилка, также состоящая из двух секций, работает при низком давлении. Регенерация адсорбента осуществляется теплым воздухом.

Озонаторы фирмы «Дегремон» различных стандартных размеров выполнены в двух вариантах: одиночные и сдвоенные. В одиночном озонаторе каждая металлическая трубка в пакете

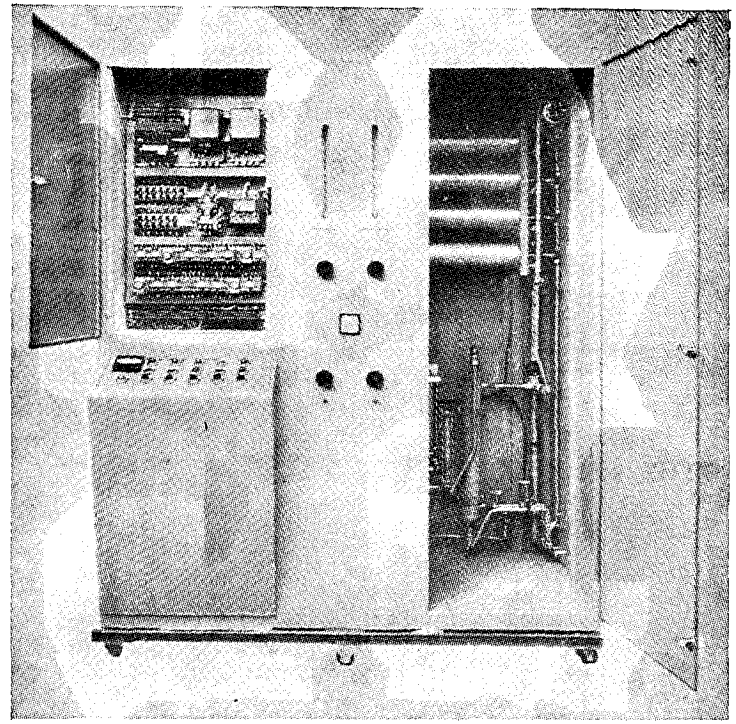


Рис. 15.10. Моноблочный озонатор типа А

имеет одну диэлектрическую трубку. В сдвоенном озонаторе два диэлектрика расположены торец к торцу в такой же металлической трубке.

Все установки имеют производительность от 0,25 до 10 кг/ч. При этом производительность моноблока достигает 2,5 кг/ч (озонатор А и МВ).

Моноблочные установки помещают в одинаковые шкафы (озонатор А) или на одной раме монтируют (озонатор МВ) блок для получения озона с оборудованием для кондиционирования воздуха, низковольтное оборудование, необходимое для силового снабжения автоматических и защитных устройств и приборов, и высоковольтный трансформатор. Так как применяется «бестепловой» метод сушки, воздух подается под давлением 0,5—1 МПа.

Получение озона для лабораторных целей обеспечивается установками «Озолаб T_1» и «Озолаб T_2». Их можно легко отрегулировать на производительность 0—8 г/ч и О — 16 г/ч соответственно (если озонатор снабжается воздухом) и 0—15 и 0—30 г/ч (если озонатор снабжается кислородом).

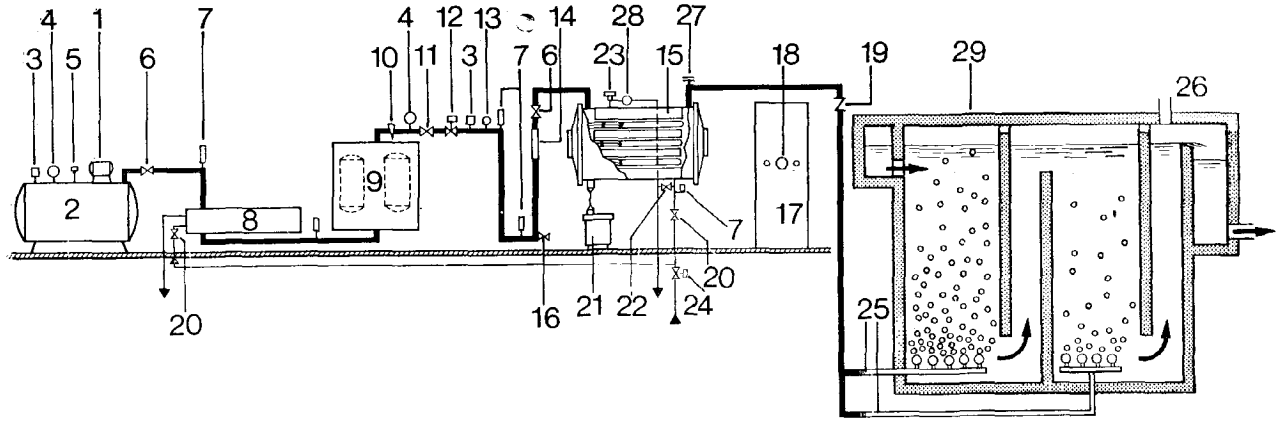


Рис. 15.11. Схема дезинфекции озоном. Работа под давлением. Осушение воздуха в одну стадию

1 — компрессор; *2* — емкость для воздуха; *3* — калиброванный клапан; *4* — манометр; *5* — маностат; *6* — регулировочный клапан подачи воздуха; *7* — термометр; *8* — охладитель-теплообменник; *9* — автоматическая сушилка; *10* — расширительный клапан; *11* — клапан выключения озонатора; *12* — электромагнитная задвижка; *13* — гигрометр; *14* — расходомер воздуха; *15* — озонатор; *16* — отбор проб сухого воздуха; *17* — электрическая ячейка; *18* — выключатель напряжения; *19* — контрольный вентиль; *20* — контрольная задвижка на трубопроводе охлаждающей воды; *21* — трансформатор; *22* — задвижка на линии слива; *23* — термометр (термостат); *24* — автоматическая задвижка; *25* — трубка диффузора; *26* — вентиляционное отверстие; *27* — отбор проб озонированного воздуха; *28* — датчик расхода; *29* — контактные колонны

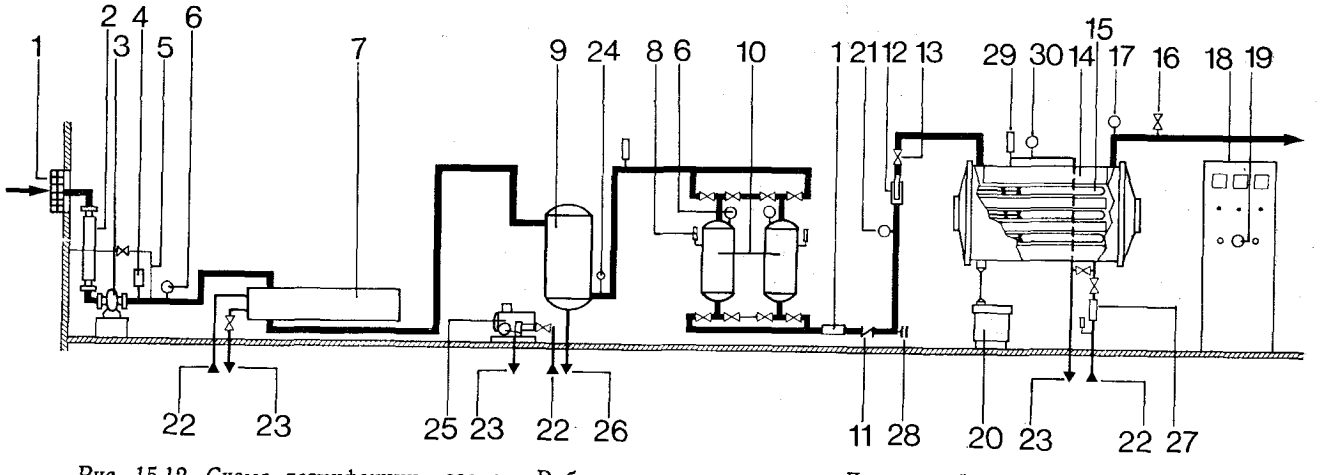


Рис. 15.12. Схема дезинфекции озоном. Работа под разрежением. Двухстадийная сушка воздуха

1 — воздушный фильтр; *2* — глушитель; *3* — воздуходувка; *4* — тарированный клапан на выпуске; *5* — задвижка на линии сброса воздуха; *6* — манометр; *7* — теплообменник-охладитель; *8* — термометр; *9* — холодильная установка; *10* — сушилки, заполненные адсорбентом; *11* — контрольный вентиль; *12* — расходомер воздуха с электрическим контактом; *13* — регулирующая задвижка; *14* — озонатор; *15* — озонаторные трубки; *16* — место отбора проб озонированного воздуха; *17* — маностат; *18* — электрический щит; *19* — выключатель напряжения; *20* — повышающий трансформатор; *21* — гигрометр; *22* — впуск охлаждающей воды; *23* — выпуск охлаждающей воды; *24* — термостат; *25* — насос охлаждающей системы; *26* — выпуск сконденсированной воды; *27* — расходомер охлаждающей воды; *28* — место отбора проб сухого воздуха; *29* — термометр (термостат); *30* — датчик расхода

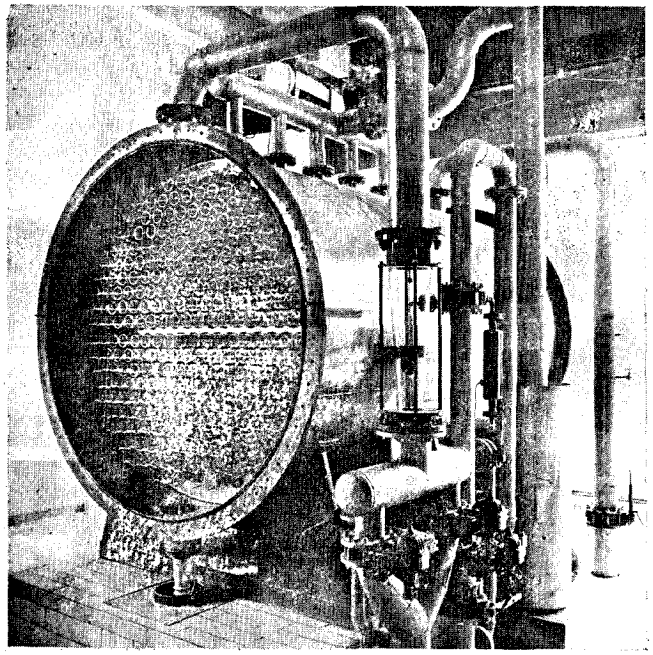


Рис. 15.13. Внешний вид озонатора

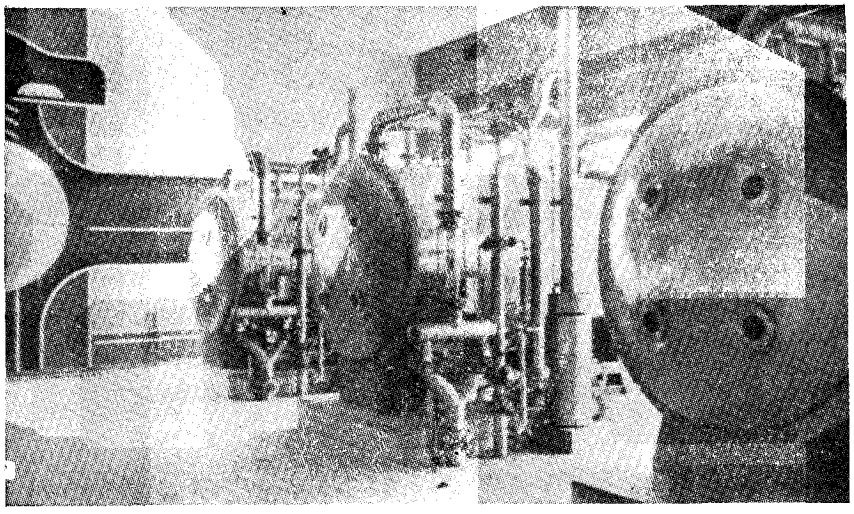


Рис. 15.14. Три озонатора типа *GL*, установленные на станции г. Нанта (Франция). Общая производительность 30 кг/ч озона

Электроснабжение озонаторов. Существует две возможности электроснабжения озонаторов в зависимости от количества получаемого озона:

когда количество мало, т. е. меньше 10 кг/ч, от одной установки, частота тока может быть той же, что и в основной сети, т. е. 50—60 Гц;

при бóльшей производительности озонаторной установки иногда экономичнее подавать на нее ток средней частоты, используя генератор постоянной частоты с выходом ниже звукового диапазона.

● Снабжение током промышленной частоты. В этом случае получение озона регулируется изменением напряжения, подаваемого на озонатор. Это может быть сделано либо ступенчато с помощью переключателя к трансформатору с несколькими коэффициентами трансформации, либо плавно с использованием различных автотрансформаторов, обеспечивающих непрерывное изменение напряжения на высоковольтной клемме трансформатора.

Так как коэффициент мощности озонатора низкий, близкий к 0,4, может быть предусмотрена индуктивная компенсация, с тем чтобы довести коэффициент мощности до значения, близкого к единице, снижая таким образом установленную мощность оборудования, выраженную в кВА.

● Снабжение током средней частоты. Ток средней частоты подается на озонаторы либо от роторных машин, либо от генераторов постоянной частоты, называемых преобразователями.

Роторные машины относятся к типу преобразователей, приводимых в движение электродвигателем.

Генераторы постоянной частоты — преобразователи на тиристорах, принцип действия которых заключается в выпрямлении трехфазного тока сети и получения тока средней частоты. Они управляются тиристорами, соединенными по схеме моста.

Получение озона с помощью генераторов постоянной частоты предпочтительнее; оно, в частности, позволяет:

увеличить удельную мощность оборудования; работа при частоте 300—600 гц на том же оборудовании дает возможность получить мощность и выход озона в 2 раза больше, чем при промышленной частоте;

получить при номинальной загрузке коэффициент мощности, близкий к единице;

обеспечить гибкость обслуживания, мощность, а следовательно, и уровень выработки озона.

15.4.2. ПРИМЕНЕНИЕ ОЗОНА

15.4.2.1. Принцип. Прежде всего необходимо ясно определить цель, которая должна быть достигнута обработкой озоном.

Одни из главных задач при обработке питьевой воды —

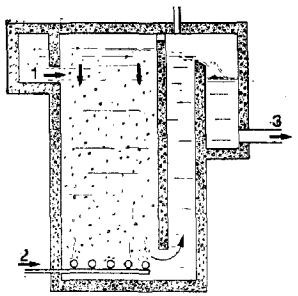


Рис. 15.15. Схема контактной колонны с одной контактной камерой

1 — впуск воды; *2* — впуск озонированного воздуха; *3* — выпуск озонированной воды

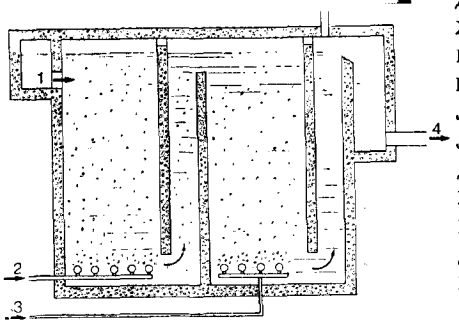


Рис. 15.16. Схема контактной колонны с двумя отделениями

1 — впуск воды; *2* и *3* — впуск озонированного воздуха; *4* — выпуск озонированной воды

улучшение органолептических свойств воды (цветность, порог запаха, привкус). В том случае, когда питьевую воду получают из малозагрязненной природной воды, можно использовать оборудование одноразового контакта, осуществляя реакцию озонирования в соответствии с местными условиями. Время контакта колеблется от 4 до 6 мин.

Чтобы обеспечить, кроме того, надежное вируцидальное действие, необходимо поддерживать в течение 4 мин концентрацию остаточного озона на уровне 0,4 г/м³. В этих условиях необходимо осуществлять контакт воды и озона в двух камерах. Вторая камера предназначена для обеспечения заданного вируцидального действия. На входе во вторую камеру уровень остаточного озона должен быть, по крайней мере, 0,4 г/м³, а для поддержания этой концентрации в течение 4 мин в камеру у ее дна должно быть подано достаточное количество озона. Количество озона, вводимого в эту камеру, остается более или менее постоянным и составляет от 0,4 до 0,6 г озона на 1 м³.

Первая камера предназначена для удовлетворения химической потребности воды в озоне. Время контакта и расход озона в этой камере зависят непосредственно от величины этой потребности. Если она невелика (ограничена снижением цветности или привкуса), расход озона может составлять 0,4—1 г/м³ при времени контакта 4—6 мин. Для дополнительного окисления микрозагрязнений рекомендуется значительно увеличить как количество подаваемого озона, так и время контакта его с водой. В зависимости от степени загрязненности воды расход озона может быть увеличен до 5 г/м³ и даже выше, а продолжительность контакта может изменяться от 4 до 12 мин в соответствии с кинетикой окисления загрязнений. В каждом случае следует попытаться определить потенциальный уровень химического загрязнения, для чего выполняются специальные лабораторные анализы.

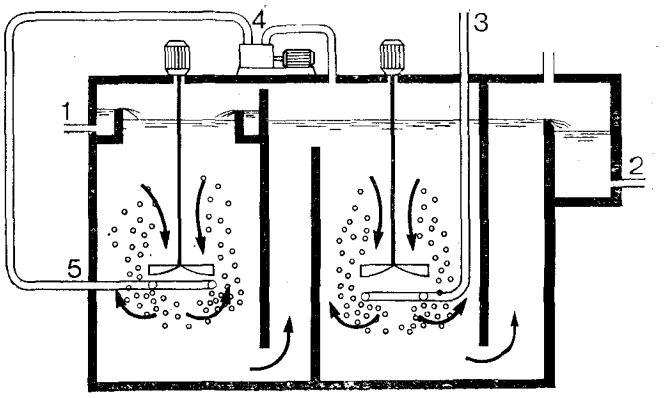


Рис. 15.17. Схема контактных колонн, установленных последовательно, с рециркуляцией воздуха, содержащего остаточный озон

1 — впуск воды; *2* — выпуск озонированной воды; *3* — впуск озонированного воздуха; *4* — компрессор для возврата озонированного воздуха; *5* — впуск рециркулирующего озонированного воздуха

В некоторых случаях (например, для удаления из воды железа и марганца) необходимо только окислительное действие озона. Тогда используют либо однокамерные контактные колонны, либо систему рециркуляции воздуха с остаточным содержанием озона (см. рис. 15.17).

При обработке производственных сточных вод можно установить последовательно несколько контактных колонн, работающих по принципу противотока для максимального использования остаточного озона.

Для обработки и дезинфекции неочищенной сточной воды (производственной или бытовой), содержащей флокулированные примеси, целесообразно использовать контактные системы импеллерного типа. Необходимость применения импеллеров обусловлена тем, что пузырьки, образованные пористыми диффузорами, не могут сами по себе создать турбулентность, достаточную для разбивания агломерированных частиц и обеспечить таким образом полное окисление бактерий и вирусов. Расход озона может достигать 10—20 г/м³. Что бы ни являлось источником сильного загрязнения воды, в любом случае для определения параметров процесса озонирования требуется провести лабораторные исследования.

15.4.2.2. Контакт озона с водой. Особое внимание должно уделяться выбору способа, которым озонированный воздух вводится в воду, так как он определяет поверхность раздела фаз газ — жидкость и концентрацию озона в газовой фазе, что, в свою очередь, обусловливает эффективность растворения озона. Если рассматривать этот вопрос только с точки зрения растворимости озона в воде, выгодно до предела увеличить концентрацию озона в озонированном воздухе. Но, когда скорость потребления озона постоянна, а концентрация повышается, возрастает мощность, потребляемая озонатором, и значительно уменьша-

ется поверхность раздела на границе вода — пузырьки, вследствие снижения объема последних. Понятно, что эффективность перехода озона в раствор возрастает с увеличением давления, при котором осуществляется инжекция газа, и, в частности, с увеличением глубины контактной камеры. В емкости глубиной 7—8 м легко добиться эффективности растворения озона, равной 95%.

Из множества способов введения озона в контакт с обрабатываемой водой, рассмотрим следующие.

Введение озона в воду с помощью инжектора. Если имеется перепад уровней, равный, по крайней мере, 2 м, то его можно использовать для работы инжектора. При этом весь поток обрабатываемой воды проходит через инжектор, в который подсасывается озонированный воздух, и образующаяся смесь подается в контактную колонну у самого дна (см. рис. 15.18). При таком способе высокая эффективность растворения озона не достигается.

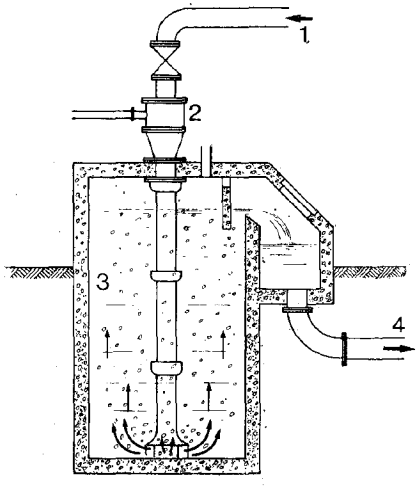


Рис. 15.18. Принципиальная схема работы установки с инжекцией озонированного воздуха

1 — впуск воды, подлежащей дезинфекции; *2* — инжектор озонированного воздуха; *3* — контактная колонна; *4* — выпуск дезинфицированной воды

Когда перепад высот меньше 2 м, поток обрабатываемой воды делят на две неравные части. Меньшую часть перекачивают, чтобы увеличить ее давление и осуществить инжекцию озонированного воздуха. Оставшаяся часть потока самотеком подается в нижнюю часть контактной колонны. Этот метод недостаточно эффективен, так как низка концентрация озона в той части воды, которая не проходит через инжектор.

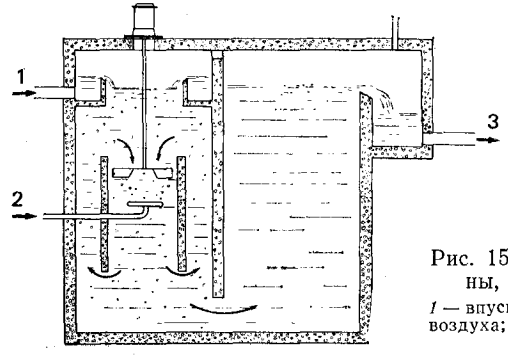


Рис. 15.19. Схема контактной колонны, оборудованной импеллером

1 — впуск воды; *2* — впуск озонированного воздуха; *3* — выпуск озонированной воды

Введение озона в воду с помощью пористых диффузоров. Пористые диффузоры в основании контактной колонны обеспечивают распределение озонированного воздуха в виде очень мелких пузырьков. Впускное устройство для дезинфицируемой воды расположено у перекрытия (см. рис. 15.15). Этот противоточный процесс обеспечивает полный контакт двух потоков. Контактные колонны, также с противоточным режимом, могут иметь несколько камер, с инжекцией в каждую из них озонированного воздуха. Озонированный воздух вводится в воду с помощью пористых трубок или дисков.

Контакт, осуществляемый с помощью специального импеллера. Дезинфицируемая вода вводится в зону всасывания импеллера, который направляет ее вниз навстречу потоку озонированного воздуха, инжектируемого под импеллер. Очень тонкая эмульсия (озонированный воздух — вода) проходит противотоком в верхнюю часть контактной колонны и снова захватывается импеллером, который обеспечивает многократную рециркуляцию потока обрабатываемой воды (см. рис. 15.19).

Импеллер специального профиля дробит пузырьки озонированного воздуха, вследствие чего газовая смесь эффективно распределяется по всему объему жидкости. Для получения таких результатов может быть использована система, описанная на с. 229 («Вортимикс»).

15.4.2.3. Деструкция остаточного озона. Воздух, выходящий из вентиляционного отверстия, после контакта с обрабатываемой водой все еще содержит некоторое количество остаточного озона. В зависимости от способа введения в воду и уровня остаточного озона, который поддерживается в обработанной воде, потери озона могут составить от 1 до 15% общего количества вырабатываемого озона.

Важно, чтобы воздух, слишком богатый озоном, не выбрасывался в атмосферу. В некоторых случаях разбавление атмосферным воздухом оказывается достаточным, но обычно производят постоянную деструкцию избытка озона химическим, термическим или каталитическим методами. Можно также возвратить воздух с остаточным озоном в начало контактной установки, хотя этот вариант вызовет значительный перерасход энергии на компремирование воздуха, содержащего остаточный озон, или на работу импеллера, обеспечивающего рециркуляцию, и дает незначительный результат, в частности, при обработке питьевой воды. В самом деле, при низкой концентрации остаточного озона (0,2—1 г/м³) эффективность растворения его оказывается очень низкой (50%). Кроме того, такая рециркуляция не решает до конца проблему ликвидации остаточного озона, концентрация которого в воздухе не должна превышать 2 мг/м³.

15.4.2.4. Меры предосторожности при использовании озона. Необходимо учитывать расстояние, на котором находится первый потребитель воды, обработанной озоном. Озон неустойчив в водном растворе, но когда концентрация его в воде на выходе из контактной колонны составляет 0,4 г/м³, его следы могут быть обнаружены спустя более получаса или час. По этой причине при коротком времени контакта в емкости для обработки воды иногда наблюдается коррозия технического оборудования в местах потребления воды, расположенных близко к станции обработки. Поэтому рекомендуется нейтрализовать избыток озона в воде, поступающей в магистральный трубопровод.

Может случиться, что вода на некоторое время остается в резервуаре чистой воды или потребители находятся далеко от станции обработки воды. В этом случае концентрация остаточного озона в трубопроводах окажется равной нулю. Отсутствие дезинфектанта в воде может привести к развитию планктона или бактерий в подающей системе.

Чтобы избежать размножения этих микроорганизмов, обычно после обработки воды озоном в нее инжектируют небольшое количество дезинфицирующего средства с длительным эффектом действия. Для этой цели можно использовать хлор или диоксид хлора без риска придать воде какой-либо необычный привкус или запах, так как органические вещества, могущие вызвать их, уже окислены озоном.

Результат действия озона зависит от температуры. Иногда находят, что при температуре ниже 5° С действие озона на примеси воды, придающие ей привкус и запах, снижается.

По этой причине, имея дело с водой, температура которой непостоянна, часто рекомендуют сочетать обработку воды озоном и активированным углем.

15.4.2.5. Методы определения озона. *Определение озона, присутствующего в воде.*

● Колориметрический метод: см. «Метод анализа 214 В».

● Объемный метод. Озон вытесняет йод из раствора иодида калия. Выделившийся йод титруют раствором арсенита калия или тиосульфата натрия.

С этой целью к 1 л анализируемой воды добавляют 10 см³ 10%-ного раствора иодида калия и щепоточку или 4 см³ пасты крахмала. Смесь гомогенизируют взбалтывая. С помощью бюретки по каплям добавляют (1/35,5N) раствор арсенита натрия или тиосульфата натрия до обесцвечивания титруемого раствора. Если n — число см³ раствора, пошедшего на титрование, концентрация озона будет равна $n \times 0{,}676$ мг/л.

Примечание. Определение выделившегося йода с помощью растворов восстановителей дает общее содержание окислителей в воде. Проба воды может содержать также растворенный хлор; определение в этом случае проводится параллельно в двух пробах воды: в одной определяют оба окислителя, а во второй — после деструкции озона гликоколом, определяется хлор. Разница между двумя полученными цифрами и есть концентрация озона в воде.

Определение озона, присутствующего в воздухе.

● Спектрофотометрический метод предусматривает использование аппаратуры, специально предназначенной для этой цели, с помощью которой замеряют абсорбцию ультрафиолетового излучения озоном. Аппаратура способна работать непрерывно и показывать концентрацию озона в воздухе или кислороде, проходящем через спектрофотометр.

● Химический метод. По этому методу объем газа, замеренный с помощью счетчика с барботажным выпуском, пропускается через раствор иодида калия, в котором затем выделившийся йод оттитровывается в кислой среде тиосульфатом натрия.

Если V — объем сухого газа в стандартных литрах, пропущенного через счетчик; T — нормальность раствора тиосульфата натрия; x — объем реагента, введенного для обесцвечивания иодного раствора, то концентрация озона в газе в мг/л определится выражением $C = 24T = x/V$.

15.5. ДРУГИЕ МЕТОДЫ ОКИСЛЕНИЯ И ОБЕЗЗАРАЖИВАНИЯ

15.5.1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЕРМАНГАНАТА КАЛИЯ

Этот сравнительно дорогой реагент (стоимость его в 2,5—3 раза выше стоимости хлора) в настоящее время применяют главным образом для предварительной обработки воды с целью удаления из нее растворенных соединений марганца. Его действие на соли железа и марганца более эффективно, чем действие хлора и результат не зависит от концентрации в воде солей этих двух металлов.

Как дезинфицирующее средство перманганат калия на станциях обработки воды не применяют, так как он обладает слабым бактерицидным действием. Однако иногда, несмотря на это и на трудность его растворения, перманганат калия используют для дезинфекции резервуаров и трубопроводов перед вводом их в эксплуатацию или перед пуском после ремонта. Для этих целей концентрацию раствора перманганата калия поддерживают равной 30 г/м³ и обеспечивают время контакта, по крайней мере, 24 ч.

15.5.2. ПРИМЕНЕНИЕ БРОМА

Бром обладает антисептическими и альгицидными свойствами, которые позволяют использовать его для дезинфекции воды плавательных бассейнов. Минимальная остаточная кон-

центрация должна поддерживаться на уровне 0,4 г/м³. При этой концентрации независимо от pH бром не придает воде запаха и не раздражает глаза. Однако было установлено, что при высоком и резко колеблющемся уровне посещаемости бассейна необходимо повышать концентрацию остаточного брома до 2 г/м³, чтобы гарантировать вполне надежную дезинфекцию.

15.5.3. ПРИМЕНЕНИЕ СМЕСИ ХЛОРА И БРОМА

Некоторые специалисты считают, что удаление коли-форм из воды плавательных бассейнов облегчается при использовании смеси, состоящей из 95% хлора и 5% брома. Этот метод может быть также предложен для дезинфекции сточных вод.

15.5.4. ДЕЗИНФЕКЦИЯ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАФИОЛЕТОВОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Ультрафиолетовое излучение испускают ртутные лампы с очень низким давлением паров ртути; мощность ламп составляет 200 Вт, а среднее время работы от 2000 до 4000 ч. Длина волны лежит в пределах 200—300 нм с максимумом бактерицидного действия около 250 нм.

Дезинфицируемая вода должна протекать вблизи лампы с минимальной толщиной слоя воды, чтобы ультрафиолетовые лучи могли быстро ею абсорбироваться. Воду применяют совершенно прозрачную.

При глубине слоя воды 15—20 см лампа мощностью 36 Вт способна дезинфицировать 3 м³/ч. Считается, что для проведения дезинфекции с достаточной скоростью практически требуется расход энергии 40 Вт·ч/м³.

Обрабатываемую воду обычно подают под давлением. Она проходит через трубу, в центре которой расположена кварцевая трубка с источником радиации. Таким образом тонкий слой воды подвергается бактерицидному действию лучей.

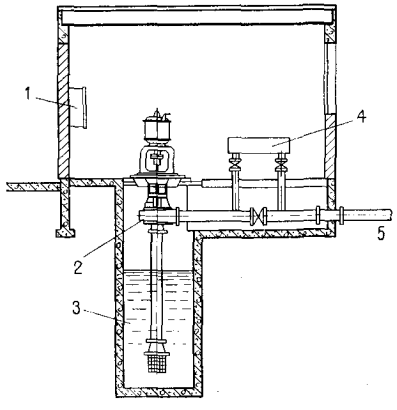


Рис. 15.20. Схема дезинфекции ультрафиолетовыми лучами

1 — электрическая ячейка; *2* — насос; *3* — скважина; *4* — дезинфектор; *5* — к распределителю

15.5.5. ДЕЗИНФЕКЦИЯ СЕРЕБРОМ

Этот электролитический олигодинамический метод дезинфекции предполагает присутствие в воде серебра в виде ионов. До сих пор процесс дезинфекции с помощью серебра не нашел удовлетворительного объяснения и целесообразность его применения до сих пор остается предметом спора. Иногда этот метод используют для обработки воды плавательных бассейнов.

15.5.6. ДЕЗИНФЕКЦИЯ ИОНИЗИРУЮЩЕЙ РАДИАЦИЕЙ

Совершенствованию этого процесса постоянно уделяется определенное внимание в связи с дезинфекцией сточных вод. В качестве источника ионизирующей радиации, как правило, используют Co^{60}, который имеет удельную активность 25 Ки/г. Его обычно применяют в виде прута диаметром 4 см различной длины. Обрабатываемая вода протекает через футляр, в который заключен источник радиации и который изолирован от радиоактивного загрязнения.

Согласно опубликованным данным, интенсивность радиации должна быть следующей: для дезинфекции $4{,}5 \cdot 10^3$ Дж/кг при 10^5 Ки/м³ч; для полной стерилизации $45 \cdot 10^3$ Дж/кг при 10^6 Ки/м³ч.

Считают, что эффективность этой установки в среднем составляет 70—90%.

16. ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА, СТАБИЛИЗАЦИЯ, УПЛОТНЕНИЕ И КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ОСАДКОВ

16.1. ИСТОЧНИКИ ОБРАЗОВАНИЯ ОСАДКОВ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА

Твердые частицы загрязнений и продукт, который из них образуется, удаляются из жидкой фазы в процессе обработки воды, скапливаются в виде суспензии различной концентрации, известной под названием «осадок». Все типы осадков представляют собой очень жидкие отходы, малоценные или совсем не имеющие цены. Одни осадки химически инертны, другие, образующиеся в процессе биологической очистки, способны к загниванию и часто имеют отвратительный запах.

Все осадки перед их выбросом в окружающую среду требуют обработки либо стабилизацией, уплотнением или обезвоживанием, возможно с последующей сушкой и сжиганием, либо комбинацией одного или более из этих процессов.

В гл. 16 и 17 дан обзор основных методов обработки осадков, образующихся в процессе очистки всех видов воды, включая воды поверхностных источников, бытовых и производственных сточных вод.

16.1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ

Необходимо классифицировать осадки для того, чтобы иметь возможность правильно выбрать метод обработки и в зависимости от него тип оборудования, которое должно быть использовано.

В табл. 16.1 сделана попытка классифицировать осадки различных типов в соответствии с их происхождением и содержанием в них гидрофильных коллоидов, которые играют основную роль в поведении осадков в процессе обезвоживания.

Состав осадка зависит как от характера загрязнений, присутствующих в воде, так и от процесса обработки, которому эта вода подвергалась: физического, физико-химического, биологического.

Гидрофильный органический осадок — один из самых распространенных категорий осадков. Трудности, с которыми сталкиваются при его обезвоживании, вызваны наличием в осадке большой доли гидрофильных коллоидов. В данную категорию включены все виды осадков, образующихся в процессе биологической очистки воды и содержащих до 90% беззольного вещества от общего содержания сухого (например, сточная вода от пищевой промышленности, промышленности органической химии и. д.). В этих осадках могут присутствовать гидрофильные гидроксиды железа и алюминия, образующиеся из неорганических флокулянтов, применяемых для обработки воды. Органосодержащие осадки требуют кондиционирования перед механическим обезвоживанием.

Гидрофильные неорганические осадки — содержат гидроксиды металлов, образующиеся в результате физико-химического процесса обработки воды, осаждения ионов металлов, присутствовавших в сырой воде (Al, Fe, Zn, Cr) или благодаря использованию неорганических флокулянтов (солей алюминия, двух- и трехвалентного железа).

Маслосодержащие осадки характеризуются присутствием в стоке небольшого количества минеральных (или животных) масел или жиров. Эти масла находятся в виде эмульсии или адсорбированы на гидрофильных или гидрофобных частицах осадка. Часть биологического осадка может также присутствовать в том случае, когда биологическая обработка является конечной стадией (например, обработка стока нефтезавода).

Гидрофобный неорганический осадок характеризуется преобладанием веществ с небольшим содержанием или отсутствием связанной воды (песок, грязь, шлак, окалина прокатных станов, кристаллизованные соли и т. д.).

ТАБЛИЦА 16.1

Принципиальная характеристика осадка	Место образования — промышленность	Метод обработки воды. Метод предварительной обработки осадка	Составные части осадка
Гидрофильный органический	1. Станция очистки бытовых сточных вод (БСВ)*	1. Первичное отстаивание (сырой осадок из первичных отстойников)	Преимущественно органические вещества: Б.В.*/С.В.*: 30—90%
		Первичное отстаивание + анаэробное сбраживание (сброженный осадок первичных отстойников)	Белковые вещества, часто легко загнивающие
		Первичное отстаивание + биологическая очистка + (сырой осадок + избыточный активный ил)	Отходы растительного и животного происхождения
		Первичное отстаивание + биологическая очистка + анаэробное сбраживание (сырой осадок + + активный ил; сброженный осадок)	Животные и иногда минеральные масла и жиры
		Продленная аэрация + аэробная стабилизация	Гидрофильные гидроксиды (Al, Fe) при физико-химической обработке
		Физико-химическая обработка (флокуляция — отстаивание)	
	2. ПСВ* от пищевой промышленности или от переработки продуктов сельского хозяйства (пивные заводы, бойни, предприятия по переработке картофеля, молочные и консервные заводы, фермы по выращиванию скота (навоз из свинарников)	2. Отстаивание Биологическая обработка, включая продленную аэрацию, аэробную стабилизацию или анаэробное сбраживание	Углеводороды (нефтехимия)
	3. ПСВ от текстильной промышленности, производств органической химии (включая нефтехимию)	3. Физико-химическая обработка (флокуляция — отстаивание). Биологическая очистка	
	4. Любая окончательная биологическая обработка	4. Биологическая очистка	

Продолжение табл. 16.1

Принципиальная характеристика осадка	Место образования — промышленность	Метод обработки воды. Метод предварительной обработки осадка	Составные части осадка
Гидрофильный, маслосодержащий	1. ПСВ от очистки нефти	Извлечение нефти, флокуляция — отстаивание/флотация	Минеральные масла и жиры Углеводороды Гидроксиды (Al, Fe) биологические Б.В. (возможно)
	2. ПСВ от машиностроительных заводов		
	3. ПСВ от холодной прокатки, металлургия	Биологическая очистка	
Гидрофобный, маслосодержащий	1. ПСВ от прокатных станов	Отстаивание	Плотные и быстро оседающие С.В. (частицы оксидов Fe) Значительное содержание минеральных масел и жиров
Гидрофильный неорганический	1. Питьевая вода и водоподготовка для производственных целей (речная или грунтовая вода): осветление, частичная декарбонизация, деионизация, элюатов	1. Физико-химическая обработка (флокуляция — отстаивание); Нейтрализация (элюатов)	Преимущественно гидрофильные гидроксиды металлов (Fe, Al, Cr)+Б.В. (<30% от С.В.) + + $CaCO_3$ (удаление карбонатов или $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ (нейтрализация H_2SO_4)
	2. ПСВ от обработки металлов (травлением, анодированием, гальванизацией, окраской)	2. Нейтрализация + + флокуляция — отстаивание Обезвреживание (цианиды, Cr^{+6}) + + флокуляция — отстаивание	
	3. ПСВ от производств неорганической химии	3. Так же, как в п. 1	
	4. ПСВ от производства красящих веществ; красильные фабрики	4. Так же, как и в п. 1 + возможно биологическая обработка	4. Минеральные + + органические вещества
	5. ПСВ от кожзаводов	5. Так же, как и в п. 4	5. Минеральные + + животные жиры и органические вещества
	6. Полная очистка ПСВ с целью рециркуляции	6. Так же, как и в п. 1+фильтрация	
Гидрофобный неорганический	1. Водоподготовка для призводственных целей — удаление карбонатов (речная или грунтовая вода)	Нейтрализация-флокуляция — отстаивание	Плотные неорганические примеси. Небольшое количество гидроксидов (Fe, Al, Mg<5% от С.В.) Небольшое содержание Б.В. (<5% от С.В.)
	2. Производство чугуна и сталелитейные заводы — литейные цеха — газоочистка		

Продолжение табл. 16.1

Принципиальная характеристика осадка	Место образования — промышленность	Метод обработки воды. Метод предварительной обработки осадка	Составные части осадка
	3. Промывка угля		
	4. Сжигание мусора Очистка газов сжигания		
Волокнистый	1. ПСВ от производства целлюлозы	Отстаивание или флотация	Волокна целлюлозы + возможно опилки и стружка
	2. ПСВ от производства бумажной пульпы		
	3. ПСВ от производства картона	Флокуляция — отстаивание	Волокна целлюлозы + + гидрофильные гидроксиды (в различном количестве)
		Флокуляция — отстаивание и, возможно, биологическая очистка	Волокна целлюлозы + возможно биологические Б.В.

* Условные обозначения: Б. В. — беззольное вещество; С. В. — сухое вещество; ПСВ — производственная сточная вода; БСВ — бытовая сточная вода.

Обезвоживанию этого типа осадков, которое в принципе протекает легко, может мешать присутствие гидрофильных неорганических веществ, коагулирующих агентов, использованных при обработке воды.

Волокнистый осадок, как правило, легко обезводить, за исключением тех случаев, когда интенсивная очистка от волокна делает его гидрофильным в результате появления в нем гидроксидов металлов или активного ила, либо того и другого.

16.1.2. ФАКТОРЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ПРИРОДУ ОСАДКОВ

Содержание сухого вещества обычно выражается в г на 1 л или в процентах и определяется сушкой при 105° С до постоянной массы. В жидких осадках оно приблизительно близко к концентрации взвешенных веществ, определяемых фильтрованием или центрифугированием.

Содержание беззольного вещества выражается в % по массе от содержания сухого вещества. Определяется сжиганием при температуре 550—600° С.

В гидрофильных органических осадках этот показатель часто близок к содержанию органических веществ и характеризует содержание азотистых веществ.

Элементарный состав (особенно важен для органических осадков):

C и H, чтобы определить степень стабилизации или установить общую калорийность;

N и P, чтобы оценить удобрительную ценность осадка;

другие компоненты (например, тяжелые металлы).

Для неорганических осадков часто полезно определять содержание Fe, Mg, Al, Cr, солей Ca (карбонаты и сульфаты) и Si.

Состав иловой воды: растворенные вещества; щелочность по метилоранжу и фенолфталеину, а также ХПК, $БПК_5$, pH **и т. д.**

16.1.3. ФАКТОРЫ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ СТРУКТУРУ ОСАДКОВ

Кажущаяся вязкость и связанная с ней текучесть осадка. Иловая суспензия не является ньютоновской жидкостью, поскольку найденное значение вязкости очень относительно и зависит от приложенного напряжения сдвига.

Для некоторых осадков (с определенными оговорками) может быть найдена вязкость, известная как вязкость по Бингаму, для характерного напряжения сдвига $T_в$ (рис. 16.1).

Вязкость можно рассматривать как меру интенсивности сил взаимосвязи между частицами. Она также позволяет оценить, тиксотропный характер осадка (способность осадка образовывать гель в состоянии покоя и возвращать текучесть даже при слабом встряхивании). Это свойство очень важно для оценки способности осадка к сбору, транспортировке и перекачиванию.

Гранулометрический состав.

Характер воды, содержащейся в осадке. Эта вода представляет собой сумму свободной воды, которая может быть легко удалена, и связанной, включающей коллоидальную гидратную воду, капиллярную, клеточную и химически связанную воду. Выделение связанной воды требует значительных усилий; например, клеточная вода, в частности, может быть отделена только тепловой обработкой (термическим кондиционированием, сушкой или сжиганием).

Соотношение между свободной и связанной водой является решающим фактором в оценке способности осадка к обезвоживанию. Приблизительное значение может быть получено термогравиметрически, т. е. построением кривой потери массы образцом уплотненного осадка при постоянной температуре и обработке в соответствующих условиях (рис. 16.2). Точку, в которой термограмма имеет перелом, можно определить построением зависимости $V=f(S)$, где V — скорость суш-

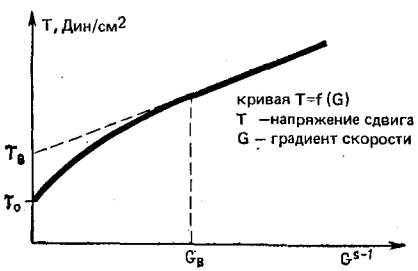


Рис. 16.1. Определение вязкости по Бингаму

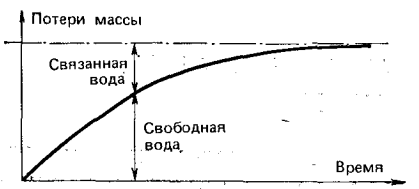


Рис. 16.2. Термогравиметрия осадка

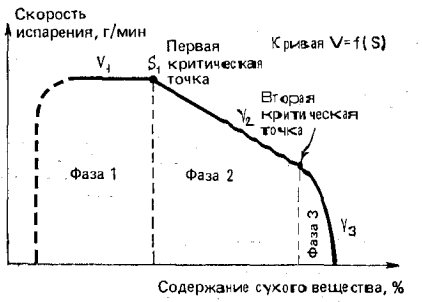


Рис. 16.3. Кривая обезвоживания осадка выпариванием при постоянной температуре (V — скорость испарения, S — содержание сухого вещества в осадке)

ки; S — содержание сухого вещества в образце, % (рис. 16.3); S_L — величина, характерная для каждого осадка и соответствующая первой критической точке, представляет собой содержание сухого вещества в осадке после потери свободной воды, %. Свободная вода определяется в термогравиметрии как количество воды, способной удаляться при постоянной скорости сушки.

Термогравиметрическим методом можно оценить гидрофильные свойства осадка:

проследить изменение доли связанной воды как функции различных процессов кондиционирования;

достаточно точно оценить в лабораторных условиях характеристики обезвоживающих аппаратов;

при сравнительном изучении оценить максимальное содержание сухого вещества (%) в осадке при каждом методе обработки;

рассчитать, если требуется, энергию связи различных видов воды с веществом осадка.

Интерпретация термограмм осадков гидроксидов намного сложнее из-за присутствия большей части химически связанной воды.

16.1.4. ФАКТОРЫ, ОБУСЛОВЛИВАЮЩИЕ ПОВЕДЕНИЕ ОСАДКА В ПРОЦЕССЕ ОБЕЗВОЖИВАНИЯ

Эти факторы, связанные с использованием тех или иных обезвоживающих аппаратов, рассматриваются подробно в гл. 17. К ним относятся: способность к уплотнению (см. с. 462); числовые характеристики фильтруемости; удельное сопротивление фильтрации (см. с. 483); числовые характеристики сжимаемости осадка под влиянием увеличивающегося давления (с. 484); определение максимального % содержания сухого вещества в

осадке при данном давлении; способность к центрифугированию, характеризуемая скоростью отделения сухого вещества в центробежном поле.

16.2. КОНЕЧНОЕ НАЗНАЧЕНИЕ ОСАДКА. ПОЛУПРОДУКТЫ

Обезвреживание осадка часто связано с экономическими затруднениями и его ликвидация почти всегда является весомой статьей эксплуатационных затрат. Экономически было бы целесообразно ограничить стоимость обработки осадка (стоимость обработки складывается из расходов на заработную плату, реагенты, электроэнергию, транспорт, обезвреживание и т. д.). Между тем забота о здоровье людей и о сохранении окружающей среды иногда требует применения дорогостоящих методов их обработки.

Ниже описаны некоторые способы использования осадков и побочных продуктов их обработки.

Улучшение почвы

Для этих целей может быть использован осадок от обработки городских сточных вод и определенных видов промышленных стоков. Основные агрономические свойства такого осадка, соответственно типу обработки, приведены в табл. 16.2. Его ценность заключается больше в наличии гумусовых веществ и в улучшении водозадерживающих свойств почвы, чем в содержании питательных веществ. Он особенно пригоден для выращивания цветов, деревьев. Добавление стабилизированного или сброженного осадка к почве может помочь активизировать рост автотрофной микрофлоры, воздействующей непосредственно на минеральное питание растений. Его подают в жидком виде (после предварительного уплотнения), в виде, пригодном для разбрасывания лопатой (обезвоженный до содержания сухого вещества не менее чем 10% в случае коллоидных биологических осадков и более, чем 50% в случае очень плотных неорганических осадков) и в виде порошка (содержание сухого вещества от 65 до 90%).

ТАБЛИЦА 16.2. АГРОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОСАДКОВ БЫТОВЫХ СТОЧНЫХ ВОД (ОСАДОК ИЗ ПЕРВИЧНЫХ ОТСТОЙНИКОВ И АКТИВНЫЙ ИЛ), % НА СУХОЕ ВЕЩЕСТВО

Вид осадка	N	P_2O_5	K_2O	Органические вещества
Сырой	3—5	2	0—5	60
Активный ил	4—5	3	1	80
Сброженный осадок	2	1	0—2	40
Сброженный активный ил	2—5	2	0—5	65

Бактериологическую опасность не следует переоценивать, так как в почве микробиальные процессы значительны. Ограничения же в использовании осадка возникают или в связи с появлением запаха при

недостаточной стабилизации осадка или в связи с высокой концентрацией тяжелых металлов (Zn, Cd, Cu, Pb, Ni, Cr, Hg). Оптимальное годовое количество осадка, подаваемое на 1 га, может быть определено в каждом случае соответствующими агрономическими обследованиями. Необходимо принимать в расчет вещества, добавляемые для кондиционирования осадка перед обезвоживанием (неорганические или органические флокулирующие агенты).

Добавление осадка от обработки сточных вод к бытовым отбросам обогащает продукт активными и гумусовыми веществами. Соотношение C : N в смеси около 25 : 30 наиболее приемлемо для термофильной аэробной ферментации. Компостирование облегчает дальнейшее усвоение осадка почвой и значительно снижает количество патогенных микробов. Осадок, который обычно стабилизируется сначала биологическим методом, должен быть как можно суше для того, чтобы смешанный с мусором он имел влажность около 50%. Таким образом, почти всегда необходимо проводить предварительное обезвоживание.

Непосредственное компостирование осадка также может быть предусмотрено, но после добавления материала, содержащего углерод (опилки, солома и т. д.) и предварительного обезвоживания осадка. Если осадок имеет высокую конечную влажность, то требуется большое количество дополнительных материалов, а стоимость компостирования становится чрезмерно высокой.

Утилизация продуктов

Утилизируют только некоторые компоненты осадка:

- волокна (отходы бумажной и лесопромышленности);
- коагулянты (от обработки речной воды для использования в питьевых целях и для промышленных процессов). Когда для обработки используют сульфат алюминия, бóльшую часть реагента утилизируют последующим подкислением осадка; после рекарбонизации, химического кондиционирования и обезвоживания осадок удаляют в виде массы, которую можно брать лопатой;
- известь или карбонат кальция, если применяют интенсивную обработку известью (стоки бумажной фабрики, сточная вода, декарбонизация воды).

Можно рекомендовать совместную обработку осадка, образующегося в процессе декарбонизации, и осадка с преимущественным содержанием органических веществ, когда применяют минеральные реагенты.

Осадок от процесса декарбонизации используют также для нейтрализации кислых стоков:

- цинк, медь, хром при очистке сточных вод от поверхностной обработки металла и от других производственных процессов.

Но даже в процессе утилизации некоторых компонентов осадка, всегда остается остаток, непригодный к использованию.

Утилизация энергии

Иногда осадок используют с целью получения энергии. В качестве топлива применяют только предварительно высушенный осадок, полученный от отстаивания воды, содержащей очень много угольной пыли (например, в Руре в Германии) и суспензии масла или жира, извлеченные флотацией.

Энергия может быть получена только из осадка с высоким содержанием органического вещества и только с целью утилизации осадка.

Энергия регенерируется в двух основных формах:

получение газообразного метана в процессе ферментации (анаэробного сбраживания); этот газ используют для обогревания, получения электроэнергии или теплового кондиционирования самого осадка;

использование теплотворной способности осадка в печах для сжигания мусора.

Выделяющуюся энергию обычно используют для предварительной сушки осадка. Если осадок самовоспламеняющийся, можно утилизировать тепловую энергию, трансформируемую в электрическую и в горючие газы. В процессе сжигания происходит не только частичная или полная ликвидация органического вещества осадка, но уничтожаются патогенные микробы и исчезает способность осадка к загниванию.

Сбыт побочных продуктов. Зола может быть использована для дорожных покрытий, изготовления стабилизаторов почвы или цементов, но производство в этом направлении еще не развивается и предпочитают использовать вещества лучшего качества, которые легче обрабатываются.

Очень волокнистые осадки, непригодные к сбраживанию, могут после обезвоживания использоваться с целью стабилизации оползней, которые затем засеваются травой.

Вывоз осадка на почву. Осадок от обработки природных или сточных вод в большинстве случаев ликвидируется именно этим путем. Масса остаточного количества осадка изменяется в зависимости от способов его обработки, но даже после сжигания масса остатка существенна. Осадок может быть просто выгружен в иловые лагуны, которые рассчитаны на месяцы или годы сушки осадка за счет дренирования и испарения или может быть использован для заполнения выемок или впадин. Вместе с сухим осадком он может уплотняться намного быстрее.

Предлагается иногда вводить вещества, подобные силикатам, цементам и т. д., в жидкий осадок с целью его уплотнения. Такая смесь достаточно быстро застывает. Этот метод обработки, по-видимому, пригодный для токсичных осадков, имеет недостаток; большие площади земли, отведенной для выгрузки, надолго признаются негодными. К тому же не может не приниматься в расчет опасность выщелачивания токсичных примесей дождевой водой.

Сброс в море осадка может быть осуществлен выгрузкой его с барж или лихтеров на расстоянии от берега или путем использования длинных и очень заглубленных подводных труб. Сбросу в море предшествуют длительные и тщательные исследования поверхностных и глубинных течений, так же как очень серьезные бактериологические, биологические и рыбные экологические исследования. Деструкция патогенных микробов и разрушение органических веществ в морской воде протекают медленно. Патогенные микроорганизмы сохраняют жизнеспособность в течение нескольких суток.

Из сбрасываемого в море осадка все плавающие вещества должны быть удалены; осадок должен иметь стабильные физические, химические и биологические свойства. Предварительное смешение осадка с морской водой способствует его погружению. Таким путем Лос-Анджелес сбрасывает значительную часть сброженного осадка от обработки сточных вод в Тихий океан; илопровод длиной более 10 км проложен на глубине 70 м по морскому дну. Этот метод также применяют города, расположенные на Средиземном море, куда сбрасывают красный осадок, содержащий большое количество ферросиликоалюмината натрия от производства алюминия.

Закачка в грунт. Осадок в жидком состоянии можно закачивать в пористую подпочвенную зону, отделенную сплошным пластом глины. Прежде чем использовать этот метод, необходимо провести серьезные геологические изыскания. Буровые скважины должны быть полностью изолированы, чтобы предотвратить загрязнение водоносных слоев, через которые они проходят. Глубина инжекции принимается от 100 до 4000 м, давление должно быть 7 МПа. Эту технологию рекомендуется использовать для осадков, которые очень трудно обрабатывать. Безопасность ее применения не всегда гарантирована.

16.3. ЦЕЛЬ ОБРАБОТКИ ОСАДКА И ПРИМЕНЯЕМЫЕ МЕТОДЫ

Выбор наиболее подходящего метода обработки осадка зависит от ряда факторов — доступности свободных земель, степени сбраживаемости осадка, его способности к сушке, экологических показателей, стоимости земли, труда, энергии, реагентов, амортизации капитальных вложений, требований здравоохранения и т. д., но конечная цель будет одной и той же во всех случаях:

- уменьшение объема (это может быть достигнуто либо простым уплотнением, когда содержание сухого вещества в осадке достигает 10% или, в исключительных случаях, даже 20%, но осадок еще не настолько сухой, чтобы его можно было брать лопатой, либо сушкой в естественных условиях, механическим или тепловым способом, либо, наконец, сжиганием);

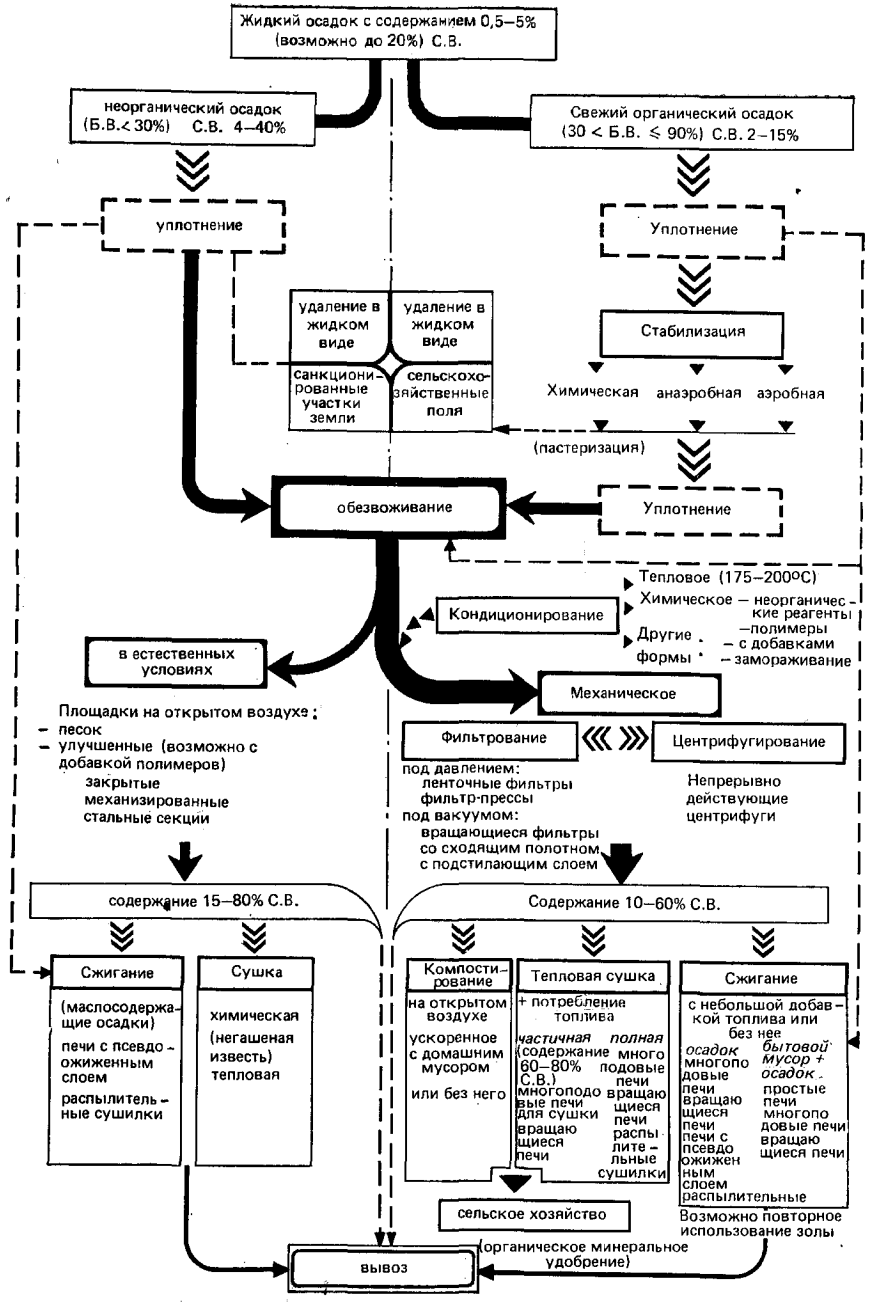


Рис. 16.4

● снижение способности к загниванию (стабилизация), которая может быть достигнута анаэробным сбраживанием, аэробной или химической стабилизацией, пастеризацией, прогреванием, сжиганием (конечная стадия).

На рис. 16.4 показаны наиболее употребляемые методы обработки и их взаимосвязь.

16.4. СТАБИЛИЗАЦИЯ ОСАДКА

16.4.1. АНАЭРОБНОЕ СБРАЖИВАНИЕ

Метановая ферментация (см. с. 109) — одно из самых мощных средств микробной деструкции, известных в биологии, и этот процесс может быть использован для разложения больших количеств органических веществ. Анаэробное сбраживание протекает в две стадии: ожижение и газификация.

Во время стадии ожижения образуются, главным образом, летучие кислоты. В процессе газификации строго анаэробные метановые бактерии образуют метан из летучих кислот или спиртов, образованных в первой стадии. Эти медленно растущие организмы очень чувствительны к изменению pH (максимальная активность в интервале pH = 6,8—7,2). Когда образуется большое количество жирных кислот, значение pH уменьшается и развитие биологического процесса сбраживания тормозится. Высокая бикарбонатная щелочность может иметь благоприятный буферный эффект.

16.4.1.1. Образование газа, температура и время сбраживания. Образовавшийся газ в основном состоит из метана (CH_4) и диоксида углерода (CO_2) в следующем соотношении по объему: 65—70% CH_4 и 25—30% CO_2.

Может присутствовать небольшое количество других газов: до 0,3% O_2, 2—4% CO, 1%N, до 1,5% углеводородов, следы H_2S.

Степень сбраживания наилучшим образом оценивается количеством образовавшегося газа. Она зависит в основном от двух факторов: температуры и времени сбраживания.

Максимальное количество газа, получаемое при сбраживании 1 кг органического вещества при различной температуре, показано на рис. 16.6.

На станциях обычно стремятся к снижению содержания беззольного вещества на 45—50%. Так как 1 кг распавшегося беззольного вещества осадка бытовых сточных вод дает от 900 до 1000 л газа, хорошо сбалансированный процесс сбраживания позволяет получить от 400 до 500 л газа на 1 кг загруженного беззольного вещества.

Температура является решающим фактором в повышении эффективности сбраживания: влияет на скорость процесса, его

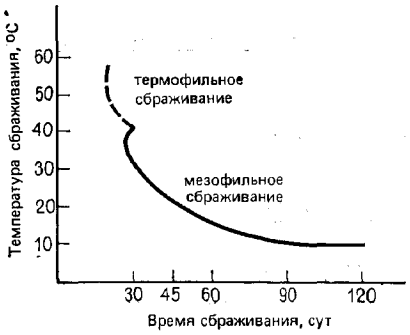


Рис. 16.5. Время, необходимое для полного сбраживания осадка городских сточных вод при различной температуре

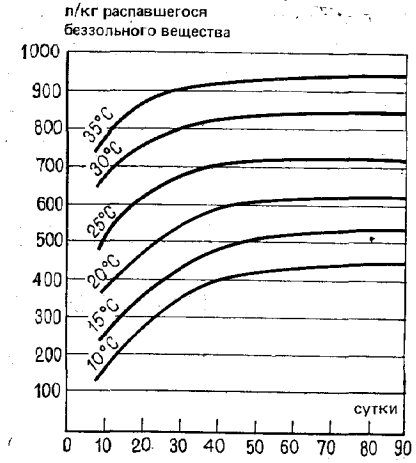


Рис. 16.6. Выход газа, как функция времени и температуры сбраживания

стабильность и на выход газа. Подогревать осадок весьма важно всегда, но на очень маленьких станциях (обслуживающих население в несколько тысяч) осадок оставляют в необогреваемом сооружении на очень длительное время.

На рис. 16.5 показано, как изменяется время, необходимое для полного сбраживания осадка, в зависимости от температуры при термофильном и мезофильном сбраживании (см. с. 25). Рассмотрим только мезофильное сбраживание при температуре ниже 35° С — наиболее стабильный режим.

Время сбраживания зависит от скорости размножения микроорганизмов; минимальное теоретическое время сбраживания может быть от 3 до 4 сут. Ниже этой величины потери микроорганизмов за счет вымывания с выгружаемым осадком выше, чем прирост новых бактерий в результате переработки органических веществ.

Общая теплота сгорания газа, образующегося при сбраживании, составляет от 22 600 до 25 100 Дж/нм^3. Это значение изменяется в зависимости от доли метана в газе; количество метана в газе тесно связано со скоростью сбраживания (теплота сгорания газа выше, когда сбраживание идет медленно).

16.4.1.2. Параметры, влияющие на эффективность анаэробного сбраживания. Полному развитию метановой ферментации способствуют следующие основные условия:

● достаточно высокая температура массы осадка и желательно стабильная;

● достаточная вместимость реактора, который должен обеспечить необходимое время сбраживания, соответствующее требуемой степени распада;

● высоко концентрированный осадок; осадок, поступающий в метантенк, должен быть, по возможности, уплотнен по двум основным причинам: во-первых, объем, а следовательно, и стоимость метантенка при сбраживании более концентрированного осадка можно снизить, обеспечивая при этом время сбраживания, соответствующее заданному эффекту; во-вторых, концентрация метанообразующих бактерий увеличивается, биохимический процесс развивается быстрее и начинается значительно легче. Для производственных условий концентрация беззольного вещества 15 г/л может рассматриваться как самый низкий предел при сбраживании осадка сточных вод. Это важный момент, особенно для пуска метантенка;

● энергичное перемешивание; оно обеспечивает контакт микроорганизмов с разрушаемым веществом и придает илу однородную консистенцию. Наблюдаемое различие между эксплуатационными показателями маленького лабораторного метантенка и промышленного объясняется очень энергичным перемешиванием, которое легко достигается в маленьких тенках. Сильное и эффективное перемешивание устраняет разницу в температурах и концентрации беззольного вещества (сырого осадка и ила в процессе сбраживания) в различных частях метантенка;

● регулярность загрузки сырого осадка и выгрузки сброженного, чтобы поддержать соотношение беззольного вещества и микроорганизмов как можно более постоянным и, таким образом, избежать каких-либо внезапных изменений в развитии микроорганизмов.

К основным факторам, которые ингибируют или мешают процессу сбраживания, относятся следующие:

1) присутствие некоторых токсичных веществ: катионов тяжелых металлов (меди, никеля, цинка); избытка ионов NH_4^+; сульфидов; некоторых органических соединений (например, цианидов, фенолов, фталатов); детергентов (при высокой концентрации);

2) внезапное изменение pH с выходом за предел оптимальных значений (6,8—7,2), вызванное поступлением щелочных или кислых растворов;

3) какие-либо внезапные изменения температуры или нагрузки.

16.4.1.3. Результаты сбраживания. Осадок бытовых сточных вод серого или желтоватого цвета содержит вещества фекального происхождения, бумагу, остатки растений и т. д., имеет неприятный запах. После полного сбраживания он становится черным (сульфид железа) и приобретает запах гудрона. Первоначальные составные части его фактически неразличимы (исключая волосы человека, шерсть животных и некоторые семена). Большинство патогенных микробов уничтожены, поскольку щелочное сбраживание имеет очень сильный бактери-

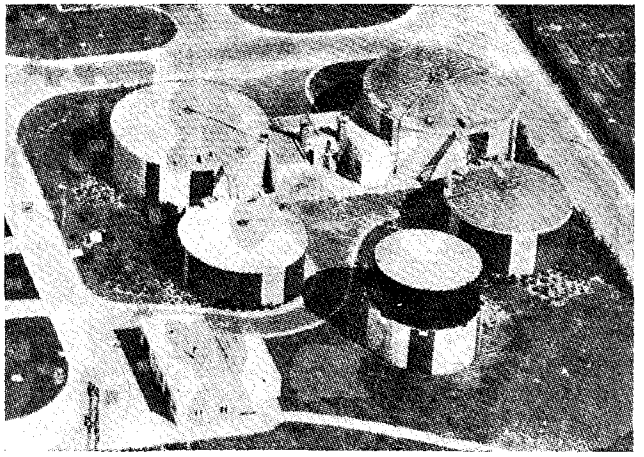


Рис. 16.7. Общий вид метантенков на станции обработки сточных вод в Туре, Франция (два первичных метантенка объемом 2000 м³ и два вторичных метантенка объемом 1000 м³)

цидный эффект (но разрушение некоторых вирусов и бацилл Коха спорно).

Осадок удовлетворительно высыхает на иловых площадках на открытом воздухе, не оказывая какого-либо вредного влияния на окружающую среду.

Распад беззольного вещества x, получаемый в процессе сбраживания, можно определить по формуле

$$x = 1 - \frac{m_1(100 - m_2)}{m_2(100 - m_1)},$$

где m_1 — зольность сырого осадка, %; m_2 — зольность сброженного осадка, %.

При сбраживании осадка бытовых сточных вод распад беззольного вещества на 45—50% соответствует удалению из осадка $^1/_3$ сухого вещества и приводит к снижению его объема примерно на 30% при соответствующем уплотнении сырого и сброженного осадка. Размеры сооружений для обезвоживания осадка могут быть значительно уменьшены.

Одно из преимуществ анаэробного сбраживания состоит в получении энергии в виде ценного продукта — газа метана. Энергия образующегося газа превышает энергетическую потребность самой установки по сбраживанию (для подогрева и электродвигателей). Метан удобно хранить в газгольдерах колокольного или сферического типа.

Метантенки обеспечивают надежность работы любой очистной станции. Метантенк или метантенки представляют собой буферную емкость, которая позволяет остановить, на более или менее продолжительное время, последующие сооружения по обработке осадка (обезвоживание или сжигание) для текущего или капитального ремонта.

Сброженный осадок можно накапливать или сушить на свежем воздухе, при этом не возникает запахов.

16.4.1.4. Одно- или двухступенчатое сбраживание. Принципы проектирования. Сооружения по сбраживанию часто состоят из двух ступеней: сбраживания и уплотнения. Если оба процесса проходят в одном сооружении, осадок нельзя перемешивать очень интенсивно, потому что для уплотнения требуется зона покоя.

Если эти процессы осуществляются в двух разных сооружениях, второе предназначается для уплотнения осадка и завершения процесса брожения. Однако сброженный осадок трудно уплотняется, главным образом, из-за присутствия большого количества газа в осадке. Вследствие этого необходимо значительное время пребывания осадка в метантенке.

Если сброженный осадок не требуется уплотнять, может быть осуществлено высокоскоростное сбраживание. При этом в схеме предусматривается вторичный метантенк небольшого объема (длительность пребывания несколько суток), но можно обойтись и без него. С другой стороны, предварительное уплотнение свежего осадка полезно, так как позволяет увеличить время обработки осадка в сооружении той же емкости.

Необходимо принять к сведению, что понятие «высокоскоростное сбраживание» не применимо в целом к двухступенчатым метантенкам. Высокоскоростное сбраживание относится только к первичному метантенку, который проектируется с той целью, чтобы обеспечить быстрое и полное сбраживание. Для этого необходимо следующее:

интенсивное перемешивание, при котором обеспечивается однородная консистенция и предотвращается образование слоя пены;

надежное нагревание осадка до температуры около 35 °С при всех условиях эксплуатации (компенсировать потребность в топливе при пуске);

регулярная загрузка сырым осадком;

контроль pH осадка;

соответствующее уплотнение сырого осадка;

отбор проб в многочисленных точках;

выгрузка в нескольких точках.

Осадок бытовых сточных вод может сбраживаться при нагрузках до 5 кг беззольного вещества в сутки на 1 м³ объема метантенка (на пилотной установке).

Пределы параметров процесса брожения для метантенков со средней нагрузкой (для одноступенчатых) и высокой нагрузкой (одно- и двухступенчатых) приведены в табл. 16.3. В двухступенчатой схеме метантенк первой ступени оборудован лучшей системой подогрева и загружается уплотненным осадком.

Факторы, определяющие показатели необогреваемых метантенков, изменяются в очень широких пределах. Они зависят

ТАБЛИЦА 16.3

Сбраживание при нагрузке	Температура нагрева, °С	Метантенк I ступени: нагрузка по беззольному веществу, кг/(м³·сут)	Метантенк I ступени: время пребывания, сут	Метантенк II ступени, время пребывания, сут
Средней	До 25°С	0,8	37	—
Средней	До 35°С	1,2	25	—
Высокой	До 35°С	3—4	10	2—4

ТАБЛИЦА 16.4

	Сухое вещество: г/(чел·сут)	Сухое вещество: %	Количество осадка, л/(чел·сут)
Механическая очистка, в отстойниках:			
свежий осадок	54	5(10)	1,08 (0,54)
сброженный осадок	34	10	0,34
Станция полной очистки			
а) отстойники + + биофильтры:			
свежий осадок	74	5(7)	1,48 (1,05)
сброженный осадок	48	6—8	0,80—0,60
б) отстойники + + аэротенки:			
свежий осадок	85	4,5(6)	1,87 (1,41)
сброженный осадок	55	4—6	1,38—0,92

в большой степени от климатических и эксплуатационных условий. В районах Западной Европы с умеренным климатом процесс сбраживания практически прекращается на 3—6 мес в году. Объем метантенка должен обеспечить пребывание осадка в нем минимум 90 сут. Это время может быть снижено в отстойнике Имхофа, в котором контакт осадка и сырой воды всегда поддерживает температуру осадка выше минимальных 11—12° С, ниже которых метановая ферментация прекращается.

Для быстрого расчета станции очистки бытовых сточных вод рекомендуется пользоваться нормами по объему осадка и массе сухого вещества на душу населения, приведенными в табл. 16.4. Цифры относятся к сточной воде раздельной системы канализации, в которой взвешенные вещества содержат $^2/_3$ органических веществ, указанные в скобках значения получены после дополнительного уплотнения свежего осадка.

16.4.1.5. Проектирование метантенков. Отстойники Имхофа, или двухъярусные отстойники, представляющие собой первичный отстойник в верхней части и необогреваемый сбраживатель в нижней камере, фактически давно не используются. Их применяют в основном на маленьких станциях. Процессы продленной аэрации и аэробной стабилизации, хотя и более дорогие из-за расхода энергии, менее чувствительны к перепадам температуры, требуют меньших капитальных затрат и теперь им отдают предпочтение на малых сооружениях.

Сбраживание со средней скоростью осуществляется в одиночном метантенке с хорошим обогревом.

Метантенк необходимо оборудовать мощным средством для разбивания пены; эта система должна действовать эффективно, какой-бы ни была консистенция и глубина слоя. В системе не должны накапливаться волокнистые материалы и бумага. Выгодно использовать вращающиеся спринклеры, присоединенные к насосу для рециркуляции осадка (см. рис. 16.10).

В метантенках со средней нагрузкой, когда масса осадка не может быть перемешена очень интенсивно, свежий осадок поднимается в верхнюю часть метантенка.

В нормально работающем обычном метантенке различают три основные зоны: плавающую корку (пену), промежуточный слой (иловая вода), где концентрация сухого вещества очень низка, и нижний, придонный слой, где осадок уже сброжен или в процессе сбраживания постепенно уплотняется.

Метантенк оборудуется системой перелива с удалением через нее наименее концентрированного осадка. Перелившаяся масса обычно возвращается в начало очистных сооружений. Система может состоять либо из телескопического затвора, либо из ряда выпускных окон, расположенных на разном уровне; эта система обеспечивает поддерживание оптимального уровня осадка в метантенке.

Дно метантенка должно иметь как можно больший уклон, так как одного перемешивания недостаточно, чтобы предотвратить накопление осадка, который оседает, когда уклон невелик.

Сброженный осадок удаляется из самой нижней точки метантенка.

Газ, образующийся в процессе брожения, обычно используется в бойлерах для нагрева осадка. Газгольдер для сбора газа смонтирован на газовой линии к потребителю. Газгольдер обеспечивает постоянную подачу газа к потребителю.

Газгольдер обычно проектируют, исходя из нормы на жителя в сутки 5—10 л газа, учитывая, что потребляется 20—40% количества газа. Если газ не утилизируется, его либо выбрасывают непосредственно в атмосферу, либо (предпочтительнее) сжигают в газовых горелках.

Оборудование метантенка включает водяные затворы или механические клапаны для предотвращения образования вакуума и ограничения давления газов в верхней зоне.

Высокоскоростное сбраживание обычно осуществляют в две ступени; вторая ступень может быть открытой или закрытой. Открытые метантенки должны быть небольшие в диаметре (максимум 8 м), так как они не имеют приспособлений для дробления корки и необходимо обеспечить возможность удаления плавающей корки вручную.

Если метантенк второй ступени закрытый, он должен подобно метантенку первой ступени иметь систему отвода газа для того, чтобы остаточный газ, который продолжает выделяться до конца процесса метановой ферментации, не был потерян.

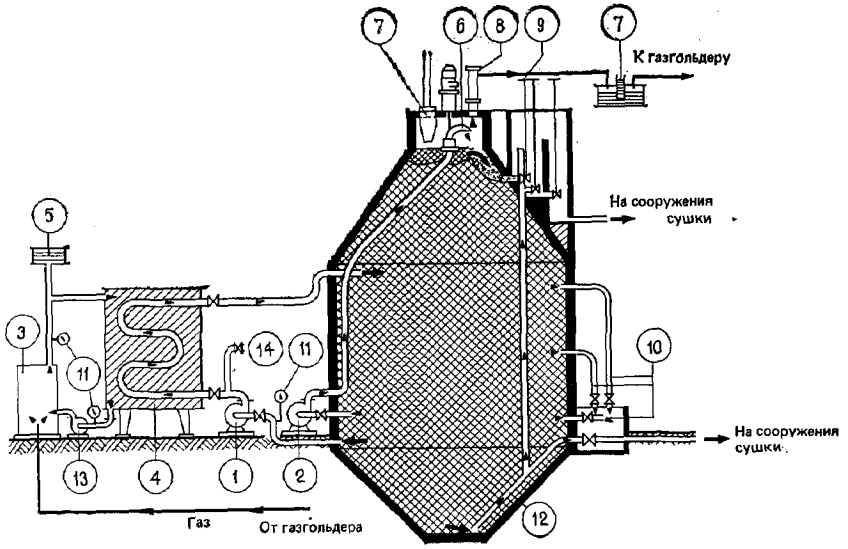


Рис. 16.8. Схема одноступенчатого метантенка, работающего со средней нагрузкой

1 — циркуляционный насос для нагреваемого осадка; *2* — циркуляционный насос осадка для разбивания пены; *3* — бойлер горячей воды; *4* — теплообменник; *5* — расширительный бачок; *6* — устройство для разбивания пены; *7* — предохранительный клапан, предотвращающий образование вакуума и повышение давления; *8* — отвод газа; *9* — удаление пены; *10* — трубопровод для отбора проб; *11* — термометр; *12* — выгрузка сброженного осадка; *13* — циркуляционный насос горячей воды; *14* — загрузка свежего осадка

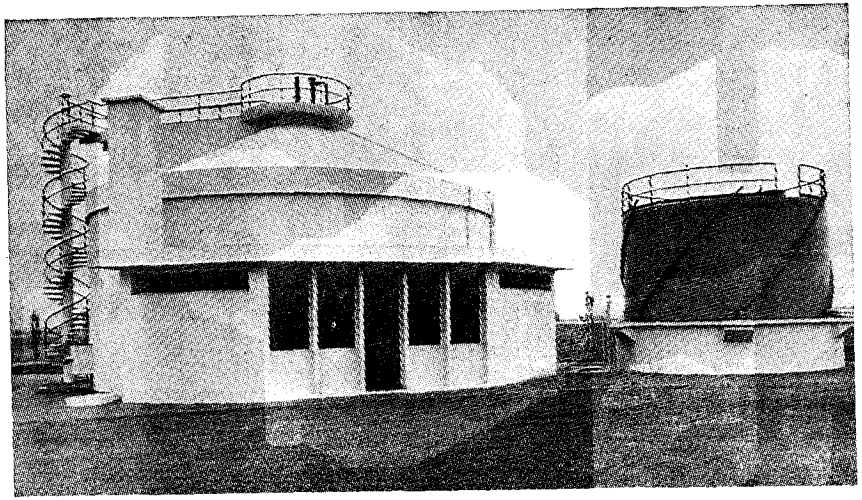


Рис. 16.9. Средненагружаемый метантенк и связанный с ним газгольдер. Станция очистки сточных вод г. Сан (Франция)

В этом случае корка разбивается теми же способами, как и в метантенке первой ступени.

Система перемешивания в метантенках. С помощью насосов осадок в метантенке может быть перемешан путем рециркуляции большого количества осадка со дна в верхнюю часть метантенка. Перемешивание ведется до тех пор, пока не произойдет полный обмен объема осадка. Так как обычно напора насоса для перемешивания бывает недостаточно, метантенк должен иметь конусное днище, чтобы предотвратить образование мертвых зон осадка. Очень глубокие метантенки дороги и по этой причине такая система перемешивания во многих случаях заменяется перемешиванием с помощью газа (рис. 16.12); осадок перемешивается газом, который подается под давлением в метантенк.

Предложено несколько вариантов ввода газа; один из эффективных методов состоит в концентрировании газового потока в центре у основания метантенка. При этом возникает сильный перемешивающий «водоворот» от центра к периферии, если конструкция метантенка имеет соответствующее отношение диаметра к высоте.

Дно метантенка очищается потоком осадка в направлении, прямо противоположном к движению поступающего осадка.

Газ, взятый из газгольдера или из-под купола метантенка, вводится через диффузоры или вертикальные трубки с интенсивностью около 0,8 м^3/(м^2·ч).

Благодаря мощному рециркулирующему эффекту применение метода перемешивания газом допускает конструкцию метантенка с небольшим уклоном днища. Перекрытию часто придают форму неподвижного купола. Могут быть использованы плавающие перекрытия, но они довольно дороги в монтаже и обслуживании.

Осадок подогревается тем же самым путем, как и в метантенке с рециркуляцией осадка.

Обогрев метантенка. Осадок иногда подогревают прямой инжекцией пара. Этот метод не приходится часто использовать из-за того, что необходимо принимать меры против опасности перегрева осадка вблизи места инжекции. Использование паровых котлов, которые стоят дорого, требует специальных предосторожностей. Наиболее часто применяют подогрев осадка горячей водой. Может быть использован змеевик, в котором осадок циркулирует медленно или трубчатый теплообменник (см. рис. 16.14) с быстро циркулирующим осадком (1—1,5 м/с) и горячей водой (1,5—25 м/с), позволяющий получить коэффициент теплообмена до 45 000 Дж/(°С·м^2·ч).

Кроме того, при подогреве сырого осадка подогревающая система должна компенсировать потери тепла за счет радиации и конвекции.

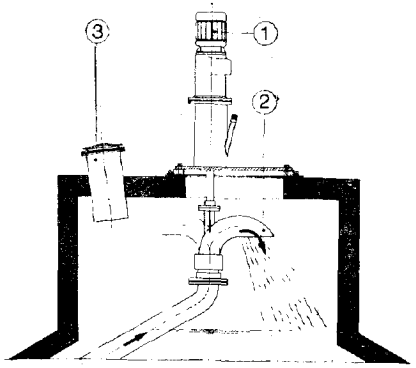


Рис. 16.10. Схема гидравлического устройства для разрушения пены

1 — электродвигатель с редуктором; *2* — вращающийся спринклер; *3* — смотровое окно

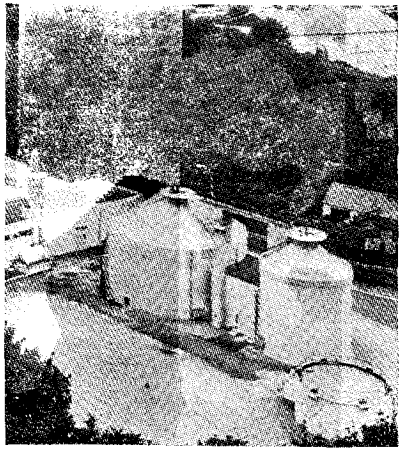


Рис. 16.11. Котельная, метантенки с гидравлическим перемешиванием и газгольдер. Станция очистки сточных вод города Сен-Брийок (Франция)

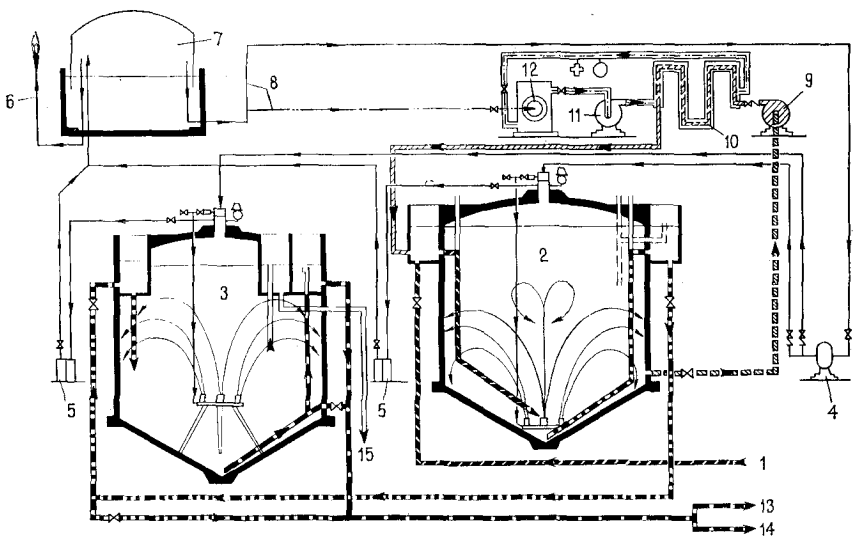


Рис. 16.12. Схема двухступенчатого процесса сбраживания с перемешиванием бродящего осадка с помощью газа

1 — загрузка свежего осадка; *2* — метантенк первой ступени; *3* — метантенк второй ступени; *4* — компрессор для газа; *5* — водоотделитель; *6* — газовая свеча; *7* — газгольдер; *8* — к котельной и воздуходувкам; *9* — циркуляционный насос осадка; *10* — теплообменник; *11* — насос горячей воды; *12* — бойлер; *13* — к сооружениям окончательной обработки осадка; *14* — к лагунам; *15* — перелив

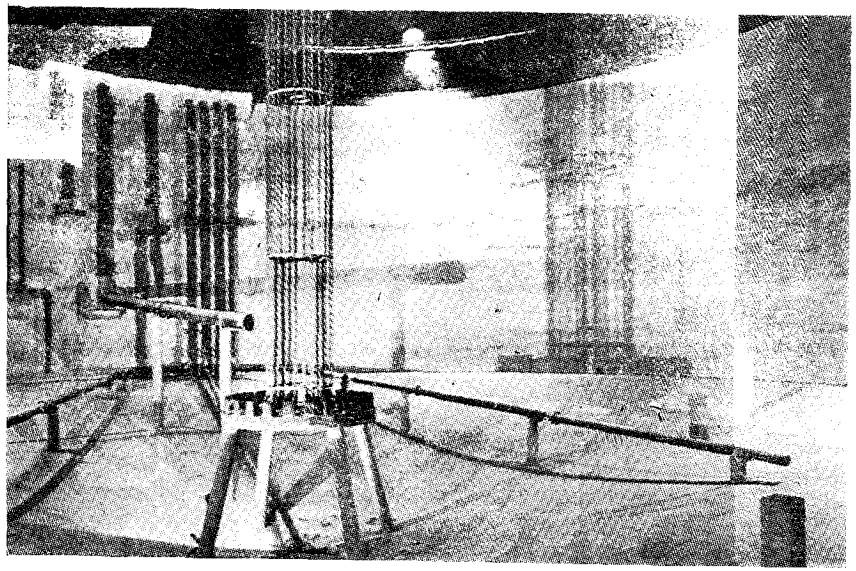


Рис. 16.13. Внутренний вид метантенка диаметром 33 м. Станция очистки сточных вод Ашер IV, Париж, Франция

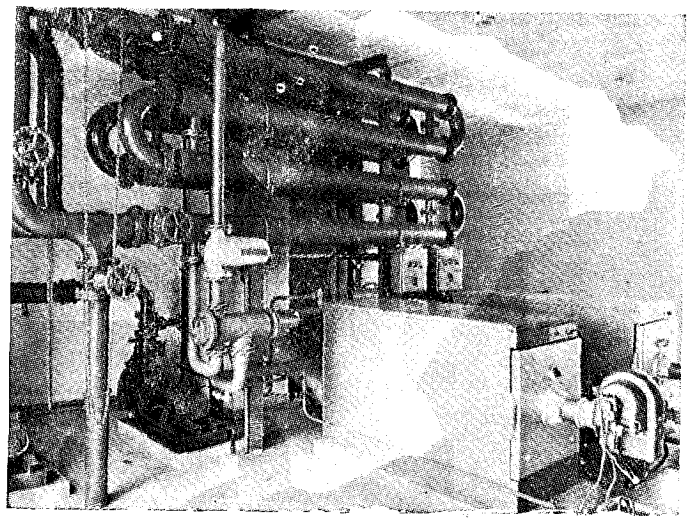


Рис. 16.14. Система подогрева сбраживаемого осадка: бойлеры, насосы и теплообменники

Коэффициент теплопередачи зависит от использованного материала и грунтовых условий в месте строительства сооружения. Потери тепла могут значительно возрастать, если основание метантенка лежит ниже уровня грунтовых вод. Для стран с умеренным климатом внешние потери тепла могут быть оцене-

ны в первом приближении в 2100—2500 Дж/(м³·сут) для объема менее 1000 м³ и 1250 Дж/(м³·сут) для объемов свыше 3000 м³.

В большинстве случаев тепловая изоляция метантенка включает внешнюю сторону бетонной стены метантенка, оштукатуренную стену из пустотелых кирпичей или блоков, отстоящую на 20 см от основной стенки. В настоящее время увеличивается использование минеральной ваты и расширяющихся материалов, пены и т. д. для тепловой изоляции. Нагреваемый осадок забирается у основания вертикальной стенки и после прохождения через теплообменник перекачивается в метантенк в точку, по крайней мере, на 10 м отстоящую от точки забора осадка.

Свежий осадок должен быть смешан с рециркулирующим осадком, подвергшимся сбраживанию, перед подачей его в метантенк.

Температура горячей воды, используемой в высокоскоростных трубчатых теплообменниках, может достигать 90 °С. В низкоскоростных теплообменниках она должна быть не более 60 °С, чтобы предотвратить перегрев осадка и засорение теплообменника.

Бойлеры, питаемые газом, полученным от сбраживания, оборудованы топкой для жидкого топлива или природного газа, чтобы осадок можно было подогревать в период пуска станции, а также в случае, если газа брожения не хватает.

На паровых котлах и в некоторых местах потребления газа часто устанавливают предохранительные устройства, препятствующие обратному удару пламени.

Количество газа, получаемого при сбраживании, значительно превышает потребность его для нагрева. Избыток может быть использован либо для питания газовых двигателей или для сооружений сушки, сжигания или тепловой обработки.

16.4.1.6. Пуск и эксплуатация метантенков. Некоторые трудности, известные из опыта эксплуатации метантенков, очень часто возникают в результате небрежности или ошибок в период пуска. Осторожный и методически выдержанный пуск — ключ к нормальной эксплуатации метантенков и удовлетворительной обработке осадка.

Метантенк не просто емкость, заполненная осадком, он представляет собой реактор, где происходят биохимические процессы, сбалансированность которых должна точно контролироваться и которые легко управляемы при постоянном наблюдении.

Оптимальные условия правильного пуска метантенков следующие:

подогрев метантенка до температуры 35 °С;

поддержание pH осадка в интервале 6,8—7,2 (в высокоскоростные метантенки часто оказывается полезным вводить около 8 кг извести в сутки в расчете на каждые 1000 эквивалентных жителей, до тех пор пока pH не стабилизируется на уровне 6,8);

равномерная загрузка, насколько это возможно, не превышающая 30% дозы загрузки для высокоскоростных метантенков;

перемешивание осадка в метантенке, когда концентрация сухого вещества в нем достигнет минимум 25 г/л.

Если следовать этим простым инструкциям, процесс сбраживания в высоконагружаемом метантенке может начаться через 2—3 недели. При пуске метантенка иногда сталкиваются с таким затруднением. В начале процесса брожения при образовании газа, богатого CO_2, внезапно появляется тяжелая пена и вся масса осадка начинает энергично бродить. Процесс пенообразования дополнительно ускоряется за счет присутствия белковых веществ и некоторых поверхностно-активных веществ, которые не разрушаются полностью. Эту проблему часто можно решить, строго придерживаясь оптимальной температуры и контролируя дозу загрузки. Как только процесс сбраживания начался, нагрузка на метантенк может быть равномерно и быстро увеличена.

Основные способы контроля работы метантенка следующие:

замер количества выделившегося газа;

замер pH;

определение содержания летучих жирных кислот (ЛЖК). Этот показатель должен быть ниже 500 мг/л (но он может подниматься до 1200 мг/л в случае обработки в высоконагружаемом метантенке малозольных осадков и тогда необходимо внимательное наблюдение);

определение щелочности (бикарбонатной и ацетатной — см. с. 110). Этот результат важно рассматривать вместе с показателем ЛЖК. Щелочность всегда должна быть намного выше, чем эквивалентное содержание ЛЖК, чтобы обеспечить достаточную буферность и устойчивый процесс брожения. Соотношение ЛЖК: щелочность (выраженное в мг/экв/л) должно быть ниже 0,5 с оптимальным значением около 0,2;

анализ газа. Непрерывное определение содержания CO_2 и CH_4 — самый быстрый метод обнаружения каких-либо аномалий в процессе сбраживания. В частности, этим способом можно обнаружить присутствие токсичных и ингибирующих веществ в реакторе. Он может быть с успехом использован на очень больших станциях, так как эксплуатационный персонал предупреждается немедленно.

Важнейшие данные, необходимые для составления отчета о работе метантенков: суточное количество сухого вещества, поступившего в метантенк (или, если это необходимо, суточный объем осадка, поданного в метантенк), суточный объем выделившегося газа и распад беззольного вещества, выраженный в процентах.

16.4.2. АЭРОБНАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ОСАДКА

Этот процесс иногда называют «аэробным сбраживанием». По этому методу осуществляется длительная аэрация осадка, чтобы обеспечить (если осадок из первичных отстойников) или продлить (активный ил) рост аэробных микроорганизмов после стадии клеточного синтеза и достичь стадии самоокисления. В этом и состоит механизм эндогенного дыхания, которое представляет собой первую стадию разрушения клеточного вещества

$$C_5H_7NO_2 + 5O_2 \rightarrow 5CO_2 + 2H_2O + NH_3.$$

Затем NH_3 окисляется биохимически, превращаясь в NO_3^-. На рис. 16.15 показана схема длительной аэрации активного ила, приводящей к снижению его массы.

16.4.2.1. Анаэробное сбраживание и аэробная стабилизация. Так как в результате аэробного окисления выделяется большее количество энергии, чем при анаэробном сбраживании, аэробные бактерии «работают» быстрее, чем метановые. Однако часть клеток, которые не могут быть разрушены биологически, больше в случае аэробной стабилизации. Сравнительная характеристика этих процессов приведена в табл. 16.5.

Подобно всем биологическим процессам аэробная стабилизация зависит от изменения температуры: с понижением ее от 20° до 10° С может увеличиться время стабилизации на 50% при равном проценте распада беззольного вещества. Но этот результат, вызываемый падением температуры, не имеет тех серьезных последствий, с которыми приходится сталкиваться при тех же температурных условиях при анаэробном сбраживании, без подогрева, когда образуется серого цвета осадок с резким неприятным запахом, плохо отдающий воду, с низким значением pH.

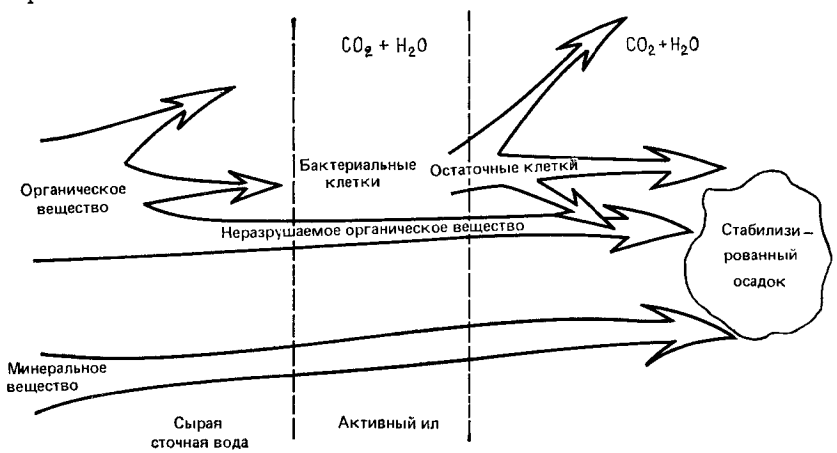


Рис. 16.15. Упрощенная диаграмма процесса аэробной стабилизации

ТАБЛИЦА 16.5

	Аэробная стабилизация	Анаэробное сбраживание
Продукты распада	CO_2, H_2O, NO_3^-	NH_4^+, H_2O, CH_4, CO_2
Энергия, доступная бактериям (на 1 моль глюкозы), Дж	2721	146
Скорость распада	Выше	Ниже
Уменьшение беззольного вещества	Меньше	Больше
$БПК_5$ иловой воды, мг/л	50—500	500—3000
$БПК_5$ на г беззольного вещества	Меньше	Больше
Соотношение $\frac{\text{беззольное вещество}}{\text{сухое вещество}}$	Выше	Ниже
Запах	Отсутствует	Отсутствует
Фильтруемость	Ниже	Выше

Скорость распада беззольного вещества при аэробной стабилизации в нормальных метеорологических условиях значительно ниже скорости анаэробного сбраживания, осуществляемого при подогреве. Уничтожение патогенных микроорганизмов также менее эффективно (около 85%), а гибель яиц гельминтов более чем сомнительна.

Тем не менее, поскольку стабилизация осадка — процесс устойчивый, легко управляемый, выдерживающий заметные изменения нагрузок и pH даже при колебаниях температуры, он применяется все шире на станциях средней производительности и очистных сооружениях в сельских местностях. Аэробная стабилизация — процесс более гибкий, чем анаэробное сбраживание, где на метановые бактерии влияют очень многие факторы (в частности, присутствие Cr^{+6} и катионов тяжелых металлов); этот процесс поэтому пригоден для обработки осадков промышленных сточных вод.

Энергозатраты для аэробной стабилизации выше, чем для анаэробного сбраживания, но капиталовложения больше для последнего.

16.4.2.2. Критерии оценки хорошей стабилизации. Стабилизированный осадок не имеет запаха и легко отдает воду. На выходе из стабилизатора он представляет собой коричневую жидкость однородной консистенции, в которой диспергированы крупные органические вещества сырой воды, но объем их меньше. Накапливать этот осадок в жидком виде в течение длительного времени нежелательно.

Эти простые критерии качественной оценки стабилизированного осадка, понятные всем, кто имеет опыт эксплуатации аэробных стабилизаторов, многими специалистами считаются недостаточными. Предлагаются следующие критерии, основанные непосредственно на результатах анализа.

Кер определяет степень стабилизации на основе максимальной скорости респирации ила, которая колеблется в пределах от 0,10 до 0,15 кг O_2/кг беззольного вещества в сутки.

Во Франции часто применяют следующий тест: «после 120 ч непрерывной аэрации голодающий стабилизированный ил должен иметь концентрацию растворенного кислорода 2 мг/л и не должен терять более 10% взвешенных веществ по массе».

Скорость распада беззольного вещества — спорная основа оценки, так как аэробная стабилизация очень часто применяется для активного ила, который не смешан с первичным осадком и поступает прямо из сооружений аэробной обработки сточной воды. В соответствии с возрастом активного ила беззольное вещество может быть в значительной степени снижено еще в аэротенке до начала стабилизации.

Кривая на рис. 16.17 показывает характер изменения смеси осадка из первичных отстойников и активного ила, первоначально содержавшей 65% беззольного вещества в процессе стабилизации.

Распад беззольного вещества может быть вычислен по формуле:

$$S = a \lg t + b.$$

Стабилизация влияет только на активное органическое вещество, наибольшее содержание которого в избыточном иле достигает 40—45% общей массы ила, между тем общее содержание беззольного вещества составляет 75%. Только биоокисляемые вещества будут распадаться в процессе аэрирования. Так как в результате распада активного биоокисляемого органического вещества в любом случае появляется остаток, равный 25% собственной массы, очевидно, что идеальная стабилизация такого ила будет означать снижение беззольного вещества на $0{,}75(40 \div 45\%) = 30 \div 35\%$. Соответствующая «минерализация» ила будет, таким образом, повышать содержание зольных веществ только с 25 до 35%.

16.4.2.3. Проектирование стабилизаторов осадка. Действительное время пребывания ила в сооружении (возраст ила) —

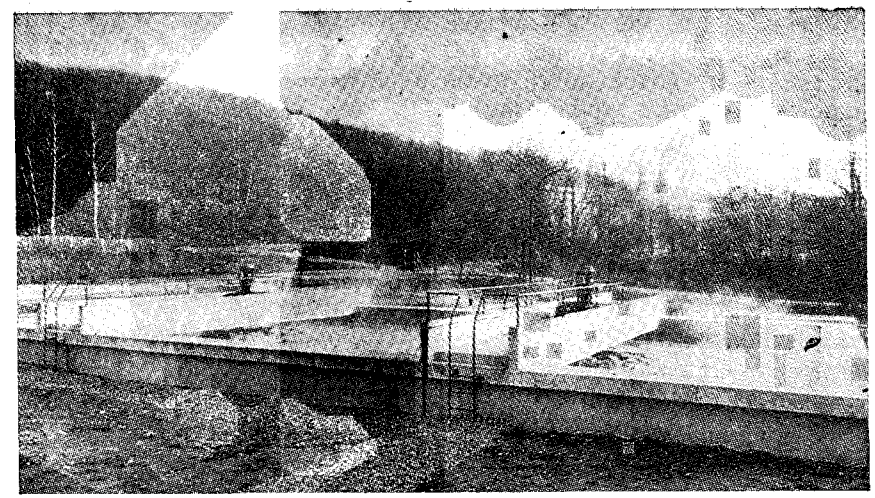


Рис. 16.16. Аэробный стабилизатор. Эланкур, Франция

основной фактор, определяющий объем стабилизатора. С увеличением возраста ила процент распада беззольного вещества повышается, но отношение распавшегося беззольного вещества к беззольному веществу в стабилизаторе обычно падает.

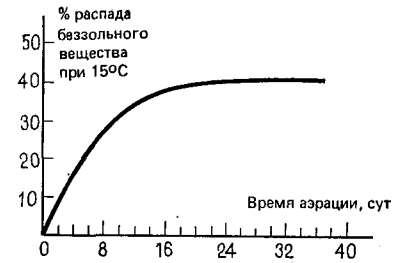


Рис. 16.17.

Для активного ила, взятого из аэротенков и содержащего около 70% беззольного вещества, продолжительность стабилизации в условиях умеренного климата наиболее часто составляет 12 сут. При тех же условиях время возрастает до 15 сут для свежего осадка (или смеси осадка из первичных отстойников и активного ила), содержащего 75% беззольного вещества. Период стабилизации тесно связан с нагрузкой на ил.

Температура значительно влияет на процесс: при одной и той же нагрузке по осадку и времени пребывания распад беззольного вещества уменьшается с 40% при 20° С до 30% при 12° С. Однако время пребывания не может быть единственным фактором, ограничивающим скорость стабилизации.

Важной также является нагрузка по беззольному веществу, выраженная в кг/сут на 1 м³ аэробного стабилизатора. Для хорошей стабилизации активного ила нагрузка не должна превышать 2 кг/(м³·сут) и 3—4 кг/(м³·сут) для смеси его с осадком. Если осадок слишком плотный, трудно добиться полной

гомогенизации смеси и быстрой диффузии кислорода к бактериальному хлопку. Установленная мощность аэраторов зависит не только от потребности в кислороде, но и от необходимости перемешивания и турбулизации.

Потребность в кислороде для полного обеспечения бактериальной флоры составляет около 0,1 кг O_2 в сутки на 1 кг беззольного вещества в стабилизаторе; она изменяется в зависимости от того, обрабатывается активный ил или сырой осадок и в соответствии с временем обработки. Коэффициент передачи кислорода ниже, чем у чистой воды. Когда важную роль играет механическое диспергирование, то та система аэрации, которая обеспечивает большую турбулентность, оказывается лучшей для аэрирования вязкого осадка.

При механической аэрации потребляемая мощность составляет приблизительно 20 Вт/м³. Мощность, необходимая для перемешивания смеси и предотвращения образования отложений, может достигать 25—30 Вт/м³ объема стабилизатора в час. По этой причине только такое значение и принимается в расчет при проектировании аэраторов. По этой же причине введение кислорода в стабилизатор обычно осуществляется прерывисто.

Если для аэрации применяют сжатый воздух, интенсивность аэрации достигает 5—6 м³/(ч·м²).

16.4.2.4. Технология аэробной стабилизации. Чтобы лучше использовать объем стабилизатора, концентрацию осадка следует поддерживать максимальной для увеличения времени стабилизации. Поэтому целесообразно уплотнять осадок перед стабилизацией, а не после нее. Если в сооружениях биологической очистки обрабатывают сырую сточную воду без первичного отстаивания, то добиться оптимальной концентрации осадка (20—25 г/л) в стабилизаторе гораздо труднее. С другой стороны, эта концентрация может быть легко достигнута, если в стабилизатор поступает осадок из первичных отстойников или его смесь с активным илом. Нецелесообразно превышать значение оптимальной концентрации, так как увеличивающаяся вязкость осадка вызовет перегрузку двигателя поверхностного аэратора или воздушного компрессора. Стабилизированный осадок уплотняется всегда медленно.

Следует прекращать аэрацию в стабилизаторе перед подачей свежего и выгрузкой стабилизированного осадка, чтобы отделить чистую иловую жидкость и повысить концентрацию выгружаемого осадка.

В качестве аэрационного оборудования применяют либо поверхностные аэраторы («Актиротор»), либо диффузоры, обеспечивающие крупно- или среднепузырчатую аэрацию («Вибрейр»).

С точки зрения диффузии кислорода, поверхностные аэраторы лучше, но в то же время при длительной работе они могут

в какой-то степени разрушать биологические флокулы, в результате чего затрудняется уплотнение и последующее кондиционирование осадка.

Подавать свежий осадок в стабилизатор следует регулярно и не менее одного раза в сутки.

В течение первых нескольких недель и даже месяцев работы часто образуется большое количество пены. Ее плотный слой может достигать 20—30 см. Образование пены связано с явлением нитрификации-денитрификации и недостаточным распадом белков или поверхностно-активных веществ. Спустя некоторое время пена уменьшается в объеме и не вызывает осложнений.

Аэробный стабилизатор должен иметь определенную форму, при которой днище полностью очищается за счет движения потока смеси (достаточный смоченный радиус см. с. 261).

Мощность механического аэратора, обеспечивающего рециркуляцию, должна быть очень высокая.

На очистных станциях малой или средней производительности (число эквивалентных жителей менее 20 тыс.) обычно применяют аэробные стабилизаторы, работающие по принципу полного смешения. Этот процесс, однако, имеет недостаток: выгружаемый на иловые площадки осадок содержит некоторое количество, хотя и небольшое, веществ, которые находились в стабилизаторе очень короткое время.

Для крупных станций лучше иметь два или более стабилизаторов, работающих последовательно, при этом в последний из них свежий осадок подавать не следует.

16.4.3. ХИМИЧЕСКАЯ СТАБИЛИЗАЦИЯ ОСАДКА

Для стабилизации осадка биологическими методами (аэробным или анаэробным) требуются сооружения большого объема. Но когда основной целью является снижение капиталовложений, то способность осадка к загниванию может быть значительно снижена добавлением химических реагентов.

Введение реагентов не влияет на количество биологически разрушаемых органических веществ, а оказывает в основном бактерицидное действие. Из существующих реагентов наиболее часто применяют известь вследствие ее низкой стоимости; эффективность действия извести изменяется в зависимости от того, используется она для обработки жидкого или обезвоженного осадка.

Если осадок жидкий, добавление извести увеличивает щелочность и pH и временно останавливает кислое брожение, сопровождающееся дурным запахом. Известь часто используют при уплотнении осадка, особенно сырого, что часто улучшает первоначальную фильтруемость осадка. Количество извести, используемое для сырых осадков, составляет около 10% массы

сухого вещества; оно может изменяться в зависимости от степени зараженности сырой сточной воды, метода обработки, температуры и времени уплотнения. Тем не менее, даже после обработки известью жидкий осадок не может храниться долго, потому что с течением времени иловые частицы разрушаются, восстанавливается способность к брожению, буферность среды снижается.

Если осадок обезвожен, известь оказывает более длительный эффект. И чем меньше содержание воды, тем стабильнее осадок и кислому брожению начаться значительно труднее. Однако не так легко смешать известь и осадок, для этого требуется очень мощное перемешивающее оборудование. Использование негашеной извести дает некоторые преимущества, так как экзотермический эффект реакции гидратации приводит к уменьшению влажности осадка.

В процессе хранения на свежем воздухе снижается содержание патогенных микроорганизмов, особенно если при обезвоживании применялись антисептики.

С повышением pH осадка выше 11 содержание колиформ снижается до 10^3 шт на 1 г сухого вещества (против 10^9, когда осадок не подвергался обработке известью), а сальмонеллы практически исчезают, при этом необходимое количество извести может превышать 30% содержания сухого вещества в исходном осадке. Влияние подщелачивания на бактерии пока не изучено, но по отношению к энтеровирусам оно эффективно.

Бактерицидное действие коагулянтов, таких как соли железа, использованных без извести, оказывается незначительным, а полиэлектролиты иногда имеют отрицательный эффект.

Для особенно быстро загнивающих жидких осадков может оказаться необходимым применение таких сильных окислителей, как хлор или перекись водорода.

16.4.4. ПАСТЕРИЗАЦИЯ

Пастеризация, строго говоря, не является стабилизационным процессом. Ее применяют с единственной целью — сделать осадок асептичным, чтобы предупредить опасность, которая могла бы возникнуть при использовании его в жидком виде в сельском хозяйстве для удобрения кормовых культур или овощей.

В процессе пастеризации осадок выдерживают при температуре 70° С около 20 мин. Обработке подвергают сырой жидкий осадок, уплотненный и неуплотненный; она оказывает разрушающее действие на вирусы.

Установка для пастеризации (рис. 16.18) обычно работает периодически и может быть полностью автоматизирована. Утилизация тепла едва ли возможна, так как процесс проводят при относительно низкой температуре. С экономической точки зре-

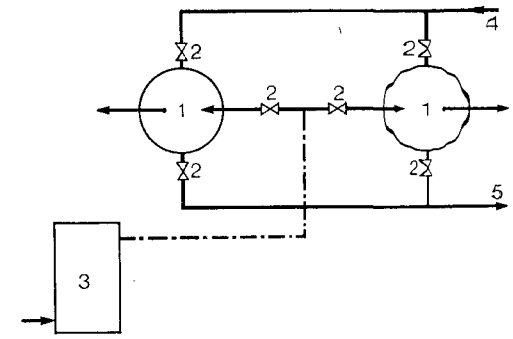


Рис. 16.18. Принцип работы варианта установки пастеризации

1 — реактор; *2* — автоматические задвижки; *3* — паровой котел; *4* — осадок, поступающий на пастеризацию; *5* — пастеризованный осадок

ния этот процесс невыгоден, так как требуется дополнительное тепло, если в составе очистных сооружений нет метантенка.

Пастеризация может быть применена для свежего, стабилизированного или сброженного осадков. Если осадок свежий, есть вероятность появления неприятного запаха после разлива.

Пастеризация оказывает незначительное влияние на коллоидную структуру осадка, так как он нагревается до невысокой температуры.

16.4.5. ОБЛУЧЕНИЕ

Облучение гамма-лучами — это один из методов обеззараживания. Результаты облучения изменяются в значительных пределах в зависимости от принятой дозы радиации. Облучение при $8 \cdot 10^3$ Дж/кг дает результаты, сравнимые с известкованием; при уровне $12 \cdot 10^3$ Дж/кг фекальная флора уменьшается в 3—5 раз.

16.5. УПЛОТНЕНИЕ ОСАДКА

Уплотнение — самый простой способ уменьшения объема осадка без больших затрат энергии, обусловливающий ряд преимуществ в работе сооружений:

- при одном и том же объеме сооружения аэробного стабилизатора или метантенка подача уплотненного осадка увеличивает длительность обработки осадка. При подаче в метантенк уплотненного свежего осадка переполнение метантенка полностью исключается;
- обеспечиваются более надежные эксплуатационные показатели. В частности, на станциях, обрабатывающих городские сточные воды, осадок из первичных отстойников может откачиваться в очень жидком виде и непрерывно, что предупреждает любую опасность засорения выгрузочных трубопроводов. Он собирается в отдельно стоящие сооружения — уплотнители, которые должны быть оснащены всеми необходимыми предупредительными и контролирующими устройствами (выгрузочным

поршневым насосом, промывными и очистительными устройствами, дополнительными решетками и песколовками, анализаторами концентрации);

- уменьшаются объемы кондиционирующих установок (особенно при тепловом кондиционировании);
- улучшаются эксплуатационные показатели сооружений по обезвоживанию, таких как иловые площадки, вакуум-фильтры, ленточные фильтры, центрифуги и особенно фильтр-прессы;
- вводится (при уплотнении осадка отстаиванием) полезная буферная емкость между сооружениями по обработке воды и осадка.

В процессе уплотнения никогда не образуется осадок, который можно было бы сгребать лопатой.

Недостаток гравитационного уплотнения состоит в том, что, не говоря уже о дополнительной стоимости (которая, вообще говоря, может быть возмещена где-нибудь в другом месте) оно может давать осадок с плохим запахом и неприятным видом. Запах может быть устранен достаточно легко — путем добавления извести, которая действительно необходима для обезвоживания сырого осадка или при пуске метантенков. Другой способ ослабления запаха — строительство закрытых уплотнителей, создание отрицательного давления в камере, окружающей уплотнитель, и обработка отсасываемого загрязненного воздуха.

При гравитационном уплотнении используют отстаивание и флотацию, которая обеспечивает более высокую удельную производительность, чем отстаивание, но требует бо́льших затрат энергии.

16.5.1. ОТСТАИВАНИЕ

Иловая суспензия подается в уплотнитель, где остается до тех пор, пока осадок не станет компактным и его можно будет удалить со дна; иловая вода удаляется сверху.

Седиментационная кривая для осадка — хороший ориентир, позволяющий определить размеры уплотнителя. Эта кривая вычерчивается на основании лабораторных исследований в сосуде достаточного объема, оборудованном, если необходимо, очень медленно работающей мешалкой. Кривая характеризует степень разделения массы осадка в опытном сосуде в зависимости от времени пребывания в нем.

Для расчета уплотнителей (в частности, для определения площади поверхности, соответствующей критической концентрации) может быть использована теория Кинша (с. 73).

Можно вычислить максимальную нагрузку F_L, соответствующую заданной концентрации выгружаемого осадка C_u. Для этого нужно провести касательную к кривой $F_s = f(C_i)$ от абсциссы C_u; наклон u определяет скорость выгрузки, а точка пересечения касательной с осью ординат — максимальную нагрузку (рис. 16.19).

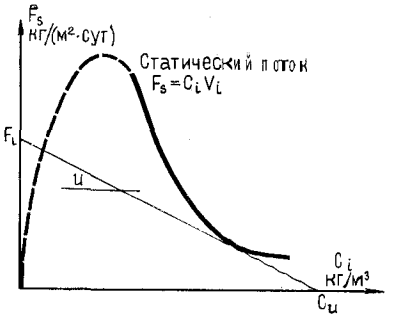


Рис. 16.19

Труднее рассчитать глубину уплотнителя, которая должна быть суммой высоты зоны уплотнения, необходимой для достижения желаемой концентрации осадка, и определенного свободного пространства. Последнее соответствует зоне осветления, где идут процессы флокуляции и осаждения. Скорость восходящего потока в этой зоне всегда должна быть меньше, чем скорость осаждения отдельных частиц иловой суспензии.

Зона осветления должна также обеспечить идеальный режим работы, если условия выгрузки уплотненного осадка изменились, и должна гарантировать удовлетворительное гидравлическое распределение жидкости по всему уплотнителю. Глубина зоны осветления обычно составляет 1—2 м и может быть больше при повышенной способности осадка к брожению.

Уплотнитель всегда должен строиться достаточно глубоким, с таким расчетом, чтобы осадок становился компактным только под действием собственной массы. Для осадков бытовых сточных вод минимальная глубина 3,5 м (с учетом зоны накопления).

Для хорошо сброженного осадка или осадка гидроксидов уплотнители могут быть глубже, при этом достигается более эффективное уплотнение.

Факторы, способствующие уплотнению:

- образование компактных, крупнозернистых частиц, которые сжимают нижележащие слои лучше, чем гидрофильные осадки биологического происхождения;
- тепловое кондиционирование и химическая обработка осадка;
- предупреждение брожения органических осадков, так как образующиеся газы мешают уплотнению. Обычный метод предупреждения газообразования — обработка известью с целью поддержания высокого значения pH.

Когда уплотняется нестабилизированный органический осадок, то он должен находиться в уплотнителе не более одних суток.

Если невозможно получить точные экспериментальные данные для седиментационной кривой, можно для расчета площади поверхности уплотнителя в первом приближении воспользоваться значениями удельных нагрузок, приведенными в табл. 16.6.

Восходящая скорость не может быть основным критерием для расчета размеров уплотнителя; если сооружение достаточ-

ТАБЛИЦА 16.6

Тип осадка	Удельная нагрузка по сухому веществу, кг/(м²·сут)	Концентрация уплотненного осадка по сухому веществу, г/л
Свежий осадок из первичных отстойников	80—120	100
Осадок из первичных отстойников + + свежий активный ил	50—70	50—70
Активный ил	25—30	25—30
Осадок от процесса удаления карбонатов	400	150—250
Осадок от подготовки питьевой воды флокуляцией с гидроксидами металлов	15—25	30—40

но глубокое, она может достигать 1 м/ч для смеси осадка из первичных отстойников и активного ила.

Уплотнители могут быть как без скребков, так и механизированные.

16.5.1.1. Уплотнители без скребковых механизмов представляют собой простые цилиндрические емкости с конусообразным днищем; их рассчитывают как статические отстойники. Наклон дна должен составлять 50—70° к горизонтали. Эти уплотнители редко заглубляют в землю; диаметр их может быть до 5 м.

16.5.1.2. Механизированные илоуплотнители (рис. 16.20, 16.21). Круглый отстойник с наклоном дна от 10 до 20° к горизонтали, оборудован вращающимся механизмом с двойной целью:

сгребать осевший осадок к центральному приямку при помощи скребков, движущихся непосредственно по дну;

помогать отделению иловой воды и газов, удерживаемых осадком, с помощью вертикальной решетки, смонтированной на вращающемся механизме.

В целом механическая система имеет прочно сооруженный центральный привод с двойным радиальным кронштейном. Большой крутящий момент привода может оказаться необходимым при обработке плотных осадков в уплотнителях большого диаметра; например, при обработке осадков от мойки свеклы крутящий момент привода для уплотнителя диаметром 40 м иногда превышает 100 000 Н·м (см. с. 187).

Сгребающая система должна состоять из ряда скребков типа жалюзи, чтобы избежать забивания их осадком в процессе перемещения последнего к центру и чтобы ослабить сцепление между частицами взрыхленного осадка.

В некоторых случаях (недостаток места, опасность распространения запаха) уплотнение может быть проведено в первичных отстойниках; отстойник-уплотнитель имеет большую зону уплотнения в центре; он оборудован несколькими радиальными кронштейнами. Сооружения этого типа очень глубокие; глубина в центре достигает 6—9 м.

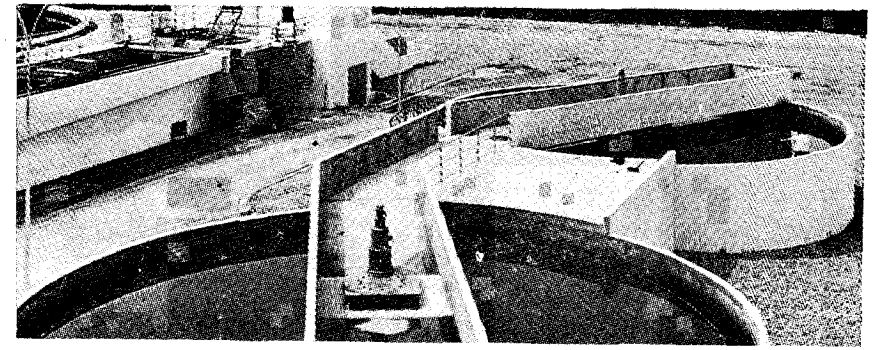


Рис. 16.20. Уплотнитель диаметром 14 м, оборудованный центральным приводом на мосту, скребками и вертикальной решеткой. Станция очистки сточных вод, г. Реймс, Франция

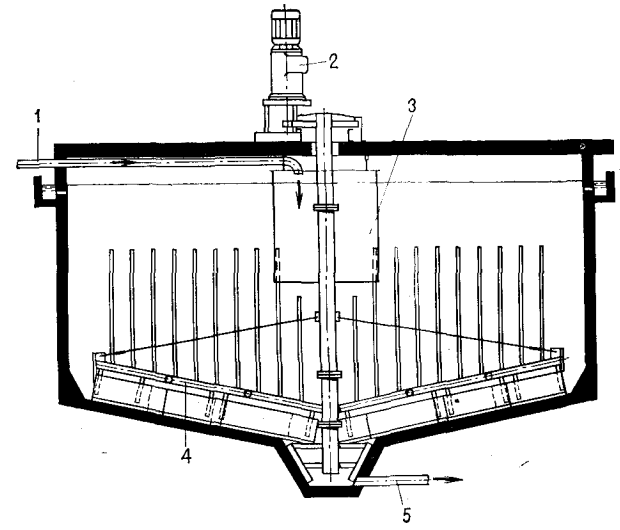


Рис. 16.21. Схема уплотнителя со скребковым устройством и центральным приводом

1 — подающий трубопровод; *2* — электродвигатель с редуктором и приводом; *3* — центральный распределительный кожух; *4* — скребковое устройство; *5* — выгрузочный трубопровод

16.5.1.3. Эксплуатация уплотнителей. Подача осадка для уплотнения может быть осуществлена снизу уплотнителя или сверху, если есть серьезная опасность засорения подводящих трубопроводов. Уплотненный осадок обычно удаляется по трубопроводу, расположенному под днищем. В некоторых трудных случаях осадок может быть удален через трубопроводы, проложенные поверху.

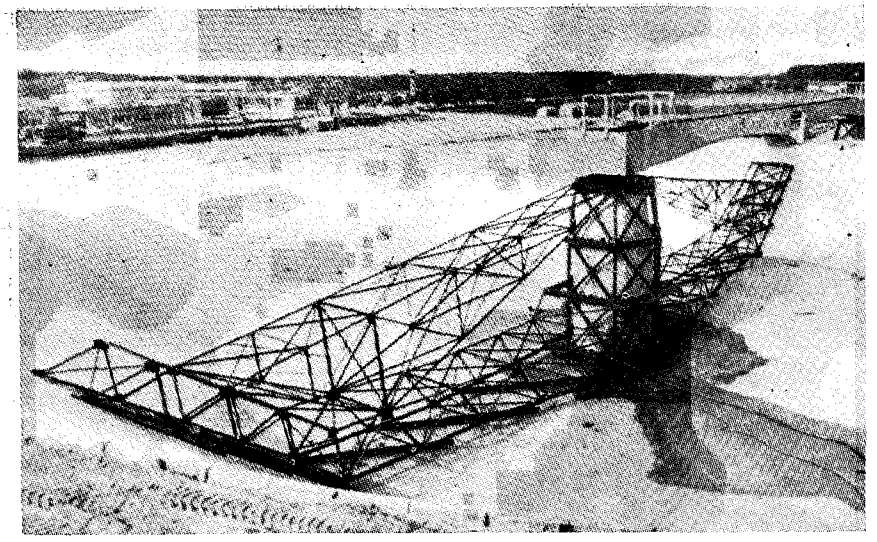


Рис. 16.22. Станция очистки сточных вод Ашер, Париж. Один из восьми радиальных уплотнителей осадка диаметром 60 м, оборудованный сгребающим устройством (общий объем 104 тыс. м^3)

На рис. 7.28 показан поперечный разрез уплотнителя, в котором подача осадка на уплотнение и выгрузка уплотненного осадка осуществляются через трубопроводы, расположенные вверху. Это очень надежная система и она рекомендуется для плотных тяжелых осадков (содержащих глину или песок).

Выпускные задвижки или насосы должны быть расположены как можно ближе к центру илового приямка уплотнителя. Объемные насосы (поршневые, эксцентриковые или диафрагменного типа) могут перекачивать более концентрированный осадок, чем простые центробежные насосы. Часто полезной оказывается прокладка проходного туннеля под дном уплотнителя.

Уплотнители без скребков, с приямком только в одном секторе или уплотнители с удалением осадка из нескольких периферийных приямков применять не рекомендуется. Управление механизмом удаления уплотненного осадка (механизированные задвижки или насосы) должно осуществляться автоматически по заданной программе или с помощью γ-лучевого анализатора концентрации.

16.5.2. ОТМУЧИВАНИЕ

Отмучивание — процесс промывки осадка чистой водой для улучшения физических и химических свойств иловой суспензии — предусматривает удаление мелких и коллоидных частиц и снижение щелочности (анаэробно сброженный осадок).

Удаление мелкой взвеси ускоряет уплотнение осадка и увеличивает производительность сооружений механического обезвоживания осадка (вакуум-фильтров, центрифуг, фильтр-прессов).

Снижение щелочности уменьшает расход реагентов, таких как хлорное железо и известь, применяемых для кондиционирования осадка (в частности, перед обезвоживанием на вакуум-фильтрах и фильтр-прессах).

Отмучивание быстро загнивающих осадков хорошо аэрированной очищенной водой снижает опасность септического брожения.

Иногда необходимо использовать мягкую воду для снижения солесодержания осадка, чтобы избежать плавления золы, образующейся при обжиге, например, для осадка от рафинирования нефти, содержащего большое количество солей (10—20 г/л NaCl).

Сооружения для уплотнения с отмучиванием работают так же, как и уплотнители с той лишь разницей, что к осадку, поступающему в сооружение, добавляется большое количество воды.

Концентрация осадка, полученного в этом декантаторе, такая же, как в обычных уплотнителях. В сливной воде из декантатора обычно содержится множество мелких и коллоидных частиц; она передается в начало очистной станции, где эти примеси сорбируются осадком в процессе флокуляции (биологической или химической).

16.5.3. ФЛОТАЦИЯ

Этот метод (см. гл. 7) имеет два преимущества: во-первых, позволяет использовать уплотнитель с небольшой поверхностью и объемом, а во-вторых, осадки с коллоидной структурой (такие как активный ил) лучше уплотняются, чем при статическом уплотнении. Это очень важное преимущество для всей системы обработки осадка.

К недостаткам метода относятся более высокие эксплуатационные затраты и невозможность накопления большого количества ила в уплотнителе.

До настоящего времени флотацию применяли, главным образом для уплотнения активного ила и улавливания волокон целлюлозы, но этот метод применим и к гидрофильным неорганическим осадкам (например, типа гидроксида алюминия), образующим хлопок низкой плотности.

Сущность флотационного отстаивания, наиболее широко применяемого в обработке осадка, заключается в расширении жидкости, которая перед этим находилась в контакте со сжатым воздухом под давлением 0,3—0,6 МПа (размер пузырька от 15 до 100 мкм).

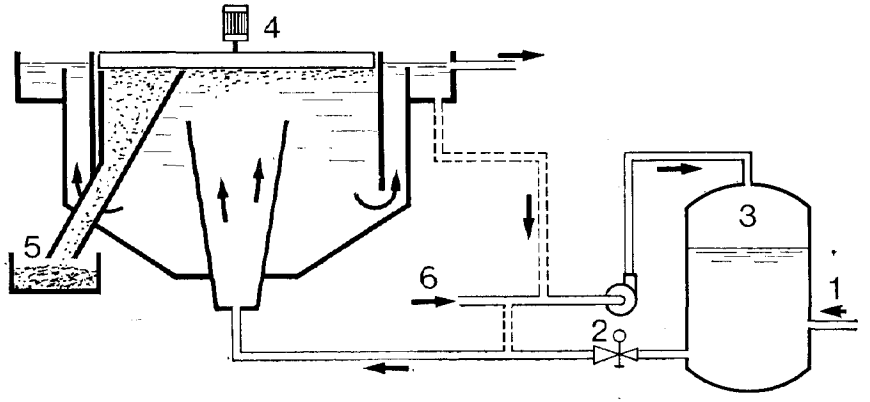


Рис. 16.23. Принципиальная схема уплотнения осадка флотацией

1 — сжатый воздух; *2* — редуктор; *3* — напорный бак; *4* — флотатор; *5* — уплотненный осадок; *6* — осадок, подлежащий уплотнению. Условное обозначение: =цикл *1* (прямое сжатие); — цикл 2 (непрямое сжатие)

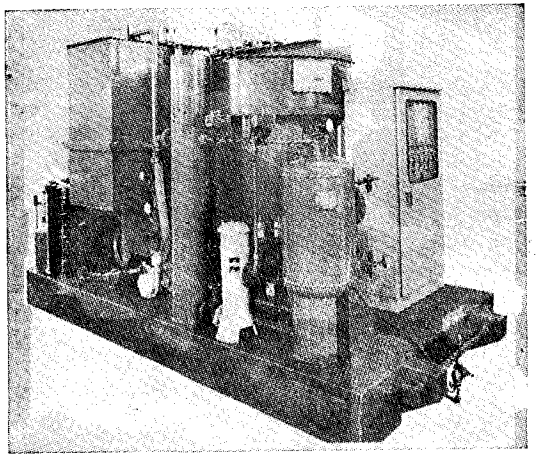


Рис. 16.24. Полупроизводственная флотационная установка

Сжатый воздух может нагнетаться в осадок двумя способами: непосредственно (в весь осадок или в часть его) и косвенно (в воду, часто в осветленную воду, с последующей инжекцией ее непосредственно после снятия давления в осадок).

Основные критерии оценки качества флотации следующие:

● концентрация ила, температура, состояние поверхности частиц, размер флокул (поддающийся изменению под действием полиэлектролита), индекс Мольмана;

● скорость растворения воздуха, присутствие поверхностно-активных веществ (которые оказывают положительное влияние), расширение без десорбции, скорость рециркуляции при непрямой подаче воздуха;

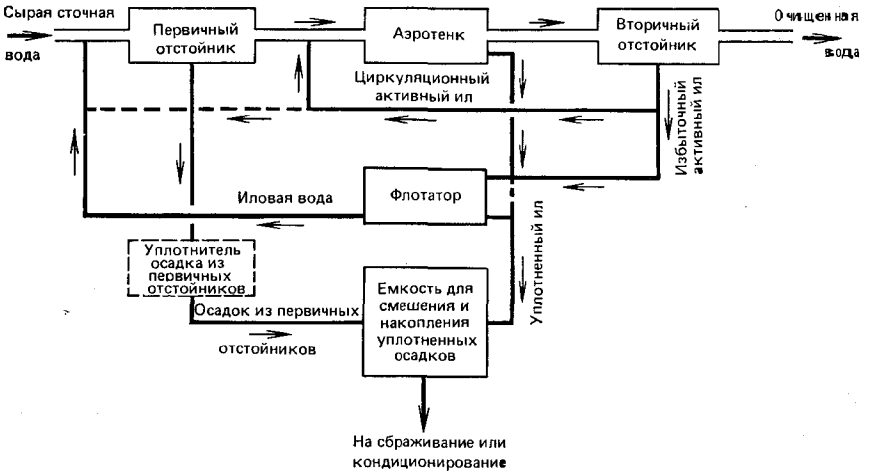


Рис. 16.25. Схема уплотнения флотацией активного ила от обработки городских сточных вод

● гидравлическая нагрузка и, кроме того, нагрузка по массе осадка.

Предпочтительней уплотнять отстаиванием смешанный, свежий и сброженный осадок. Напротив флотация очень рекомендуется для флокулированной структуры активного ила.

Гидрофильный осадок с легкими хлопьями даже при обработке в больших отстойниках (нагрузка по сухому веществу 15—20 кг/м²·сут) не становится высококонцентрированным (уплотненный осадок имеет концентрацию 15—25 г/л). На основании практического опыта уплотнения флотацией избыточного активного ила пришли к следующим заключениям:

концентрация ила по сухому веществу перед подачей на флотацию не должна превышать 6—8 г/л;

предварительная флокуляция с полиэлектролитами значительно увеличивает производительность флотационной установки и концентрацию уплотненного ила;

при проектировании флотационного уплотнителя принимают удельную нагрузку по сухому веществу 5—13 кг/(м²·ч) и гидравлическую нагрузку менее 5 м³/(м²·ч); концентрацию уплотненного осадка принимают: без полиэлектролитов 3—4,5% по сухому веществу, с применением полиэлектролитов 3,5—6% в соответствии с дозой полиэлектролита и нагрузкой;

эффективность разделения обычно выше 90% (более 95% с полиэлектролитами);

в случае непрямого нагнетания воздуха степень рециркуляции высокая (50—150%, иногда больше).

Объем накопителя осадка должен быть рассчитан на несколько часов, так как по истечении этого времени пузырьки

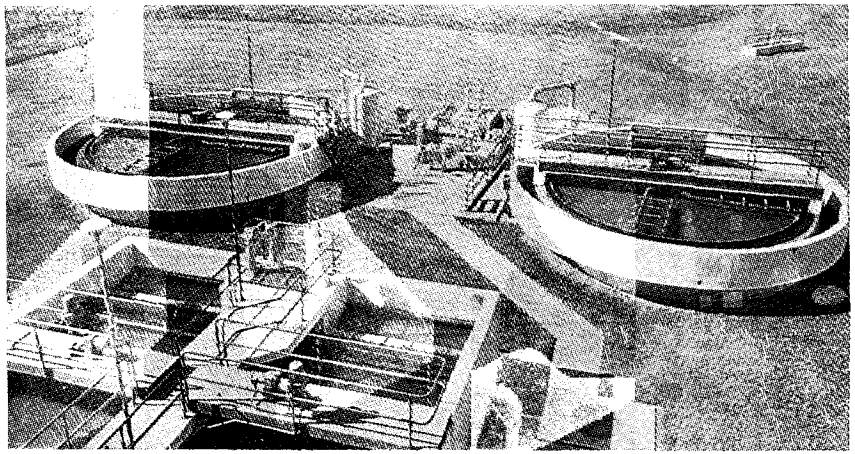


Рис. 16.26. Седифлотор диаметром 7,5 м. Аэропорт Даллас, Форт Уэрт (Техас) США

воздуха выходят из осадка и он вновь приобретает нормальную удельную массу; в течение первых нескольких часов, однако, отделение воды улучшается, что отражается на заметно увеличивающейся концентрации верхнего слоя. Этот полезный эффект выгодно используется в пост-флотационных сооружениях, которые представляют собой специально спроектированные емкости для накопления отфлотированного осадка.

16.6. КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ ОСАДКОВ

Даже после уплотнения осадок еще содержит очень много воды: 97—98%, если в сухом веществе осадка содержится большое количество органических веществ (и особенно белковых), и 70—80%, если сухое вещество осадка состоит из минеральных, тяжелых и гранулированных примесей. Чтобы получить осадок, который можно брать лопатой и перевозить на машинах, требуется дополнительное обезвоживание его. Кондиционирование проводят главным образом с целью подготовки осадка и обеспечения нормальной эксплуатации обезвоживающих установок.

В процессе снижения объема жидких осадков часто возникают затруднения, которые вызваны тем, что суспензия осадка в большинстве случаев представляет собой гидрофильную (иногда гидрофобную) коллоидную структуру. Для ослабления внутренних сил когезии в осадке требуется дополнительная энергия флокуляции, чтобы разрушить стабильность коллоидов и искусственно увеличить размер частиц. В случае гидрофильных осадков часть связанной воды может быть освобождена и трансформирована в свободную воду (см. с. 434).

Из всех процессов кондиционирования тепловая обработка намного эффективней в снижении гидрофильности частиц осадка; химическая флокуляция с использованием минеральных электролитов, и главным образом извести, также уменьшает количество связанной воды, но в меньшей степени. При кондиционировании с намерением придать осадку способность к дренированию, фильтрации и центрифугированию применяют физические методы (в частности, тепловую обработку), химические или их комбинацию. Основой эффективной работы обезвоживающих аппаратов является соответствующее кондиционирование осадка.

16.6.1. ХИМИЧЕСКОЕ КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ

Химическое кондиционирование приводит к агломерации частиц и образованию трехмерной системы или «хлопка». Применяют неорганические и органические флокулянты. Каждый из них обладает специфическими свойствами, в особенности это касается снижения гидрофильности частиц (главным образом оно наблюдается в присутствии извести) и размера образующихся хлопьев (объемистых с полиэлектролитами). Неорганические реагенты, по-видимому, более пригодны, если осадок затем подвергается сушке под вакуумом или фильтрации под давлением, а органические — в случае применения центрифуг и ленточных фильтров.

16.6.1.1. Неорганические реагенты. Поливалентные катионные минеральные электролиты и известь образуют сравнительно хороший и устойчивый хлопок.

Наиболее эффективными и дешевыми являются следующие соли:

хлорное железо $FeCl_3$ при концентрации около 600 г/л;

сульфат железа трехвалентного $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 9H_2O$;

хлорсульфат железа $FeSO_4Cl$;

сульфат железа двухвалентного $FeSO_4 \cdot 7H_2O$;

в меньшей степени различные соли алюминия.

Амфотерные электролиты (которые ведут себя как кислоты по отношению к основаниям и наоборот) проявляют двойное действие:

коагулирующее (их заряд обычно противоположен заряду частиц осадка);

флокулирующее (образуется сложный гидратированный гидроксид $[Fe(H_2O)_6, (OH)_3]_n$, который играет роль минерального полимера).

Доказано, что наиболее эффективными электролитами являются соли железа (главным образом, трехвалентного). Добавление извести (в виде 5—10%-ного известкового молока)

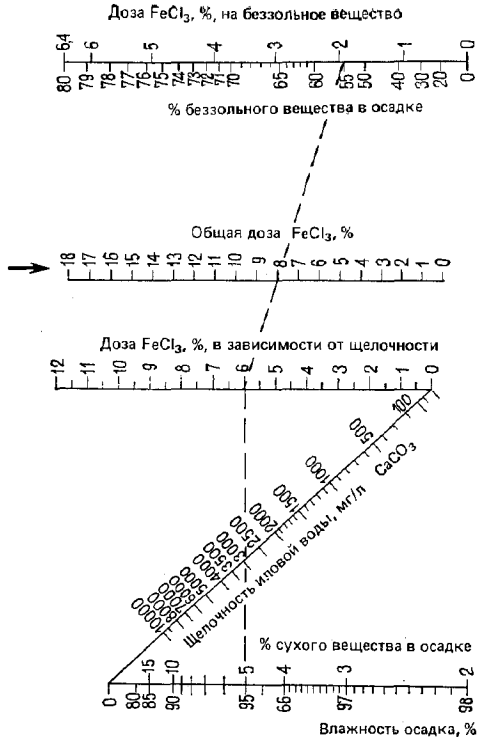


Рис. 16.27. Диаграмма Гентера. Определение дозы $FeCl_3$, рассчитанной в процентах к сухому веществу осадка

после введения раствора электролита всегда оказывает благотворное влияние, так как:

достигается подщелачивание (pH>9, что соответствует оптимальному значению pH для флокуляции);

осаждается некоторое количество органических солей кальция;

уменьшается доля связанной воды (снижение удельного сопротивления и сжимаемости и получение кека более плотного и сухого);

частично разрушается коллоидная структура осадка.

Если осадок гидрофильный и содержит гидроксид, то обычно достаточно **добавки одной извести**, чтобы улучшить фильтруемость осадка до приемлемого уровня; но расход извести большой — около 50% массы сухого вещества в пересчете на CaO.

Если осадки органические гидрофильные, то известь чаще используют в сочетании с солями железа. Дозы обычно составляют 3—12% для $FeCl_3$ и от 6 до 30% для CaO по отношению к сухому веществу осадка.

Хлорное железо — один из наиболее широко используемых реагентов. Необходимое количество хлорного железа и извести возрастает с увеличением в осадке содержания беззольного вещества.

Гентером предложена диаграмма (рис. 16.27), из которой на основе щелочности и содержания беззольного вещества в осадке (главным образом в анаэробно сброженном) можно рассчитать необходимую дозу $FeCl_3$ для варианта вакуум-фильтрации. Однако рекомендуется в каждом отдельном случае проводить некоторые простые лабораторные опыты, чтобы определить необходимую дозу реагента, замеряя удельное сопротивление фильтрации (см. с. 481).

Количество извести, рассчитанное на CaO, обычно составляет от 150 до 250% от дозы $FeCl_3$, в случае непромытого осадка.

В гл. «Обезвоживание» (с. 496) приведены значения доз для кондиционирования различных типов осадков. Они должны быть снижены, если осадок содержит большое количество волокон или минеральных веществ, и увеличены, когда он содержит белковые органические вещества.

Большая часть добавленных реагентов остается в обезвоженном осадке в твердом виде, в результате осаждения гидроксида железа $Fe(OH)_3$ и карбоната кальция $CaCO_3$. В то же самое время 20—40% массы реагентов переходит в раствор (фильтрат) в виде хлорида.

В соответствии с местными условиями и для снижения эксплуатационных затрат могут быть применены другие флокулирующие агенты вместо $FeCl_3$, в частности:

- сульфат железа: доза Fe^{2+} очень часто равна двойной дозе Fe^{3+} и его эффективность ограничена при очень гидрофильных осадках, содержащих большое количество органических веществ. Преимущество этого реагента заключается в его меньшей стоимости благодаря тому, что он является побочным продуктом травления металла и производства титана. Чтобы увеличить его эффективность, сульфат железа двухвалентного иногда окисляют до сульфата трехвалентного железа;
- соли алюминия: они значительно менее эффективны, чем соли железа и часто засоряют ткань фильтра, но дают хорошие результаты (иногда в сочетании с полиэлектролитами) на фильтр-прессах с циклом 12—24 ч;

Минеральные реагенты.

Несмотря на то, что при правильно рассчитанном перемешивающем устройстве и определенных гидравлических условиях некоторые виды осадков могут быть сфлокулированы за 1—2 мин, обычно предпочитают проектировать емкость таких размеров, при которых осадок находится в ней от 5 до 10 мин, т. е. времени вполне достаточном для формирования хлопка. Эти емкости, как правило, имеют два отделения: одно для солей металлов, другое для извести (см. схему обработки органических осадков с. 511).

Целесообразно дать возможность осадку «созреть» в течение 15—30 мин. Обычно «созревание» успевает проходить, когда осадок находится в смесителе и в корыте вакуум-фильтра или в буферной емкости перед фильтр-прессом.

Реагенты должны быть полностью смешаны с осадком, и для облегчения их диффузии сквозь массу добавляют воду. Полная автоматизация установок по кондиционированию осадка дает очень большие преимущества: обеспечивается точное дозирование реагентов в соответствии с расходом осадка и его концентрацией (γ-лучевые плотномеры и ультразвук).

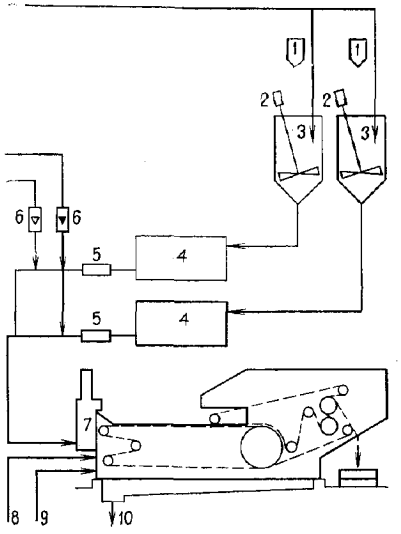


Рис. 16.28. Схема установки фильтра Прессдег с узлом приготовления раствора полиэлектролита

1 — распыляющие устройства; *2* — мешалки; *3* — емкости для приготовления раствора; *4* — емкости для хранения раствора; *5* — дозирующие насосы; *6* — расходомеры; *7* — камера флокуляции; *8* — вода; *9* — сжатый воздух; *10* — фильтрат + промывная вода

Чтобы предотвратить разрушение образовавшихся хлопьев, транспортировать осадок надо на ограниченное расстояние самотеком или, если это действительно необходимо, с помощью медленно работающих объемных насосов (поршневых или эксцентриковых), или, наконец, пульсирующей пневматической передачей под давлением.

16.6.1.2. Полиэлектролиты. Природные соединения, например, крахмал, смола, полисахариды и альгинаты, в течение многих лет использовались для кондиционирования неорганических осадков производственных сточных вод. Значительно более эффективны синтетические органические соединения — полиэлектролиты (см. гл. 5). Их применяют в меньших дозах, чем неорганические реагенты, но стоят они дороже и должны быть сильно разбавлены.

Эти соединения, состоящие из длинных макромолекулярных цепочек, способствуют ясно различимой флокуляции за счет образования мостиков между частицами в длинных разветвленных цепях полиэлектролита, следующей за коагулирующим действием в случае катионного полимера. Их применение обеспечивает значительное снижение удельного сопротивления осадка, мало или совсем не влияет на гидрофильность частиц (сжимаемость осадка остается стабильной и иногда увеличивается).

Многие полиэлектролиты постоянно есть в продаже на мировом рынке, включая хорошо известные прозедим, седипур, праестол, магнафлок, дреуфлок, суперфлок и т. д. Окончательный выбор полиэлектролита часто делается только после начала эксплуатации станции. Катионные полимеры эффективны, главным образом, при кондиционировании осадка с высоким содержанием коллоидных органических веществ; между тем анионные полимеры широко применимы к суспензиям преимущественно минеральной природы. Иногда необходимо сочетание анионных и катионных полимеров для флокуляции смеси различных видов осадка (например, биологического осадка и осадка гидроксидов). Осадок с высоким содержанием белков (выше

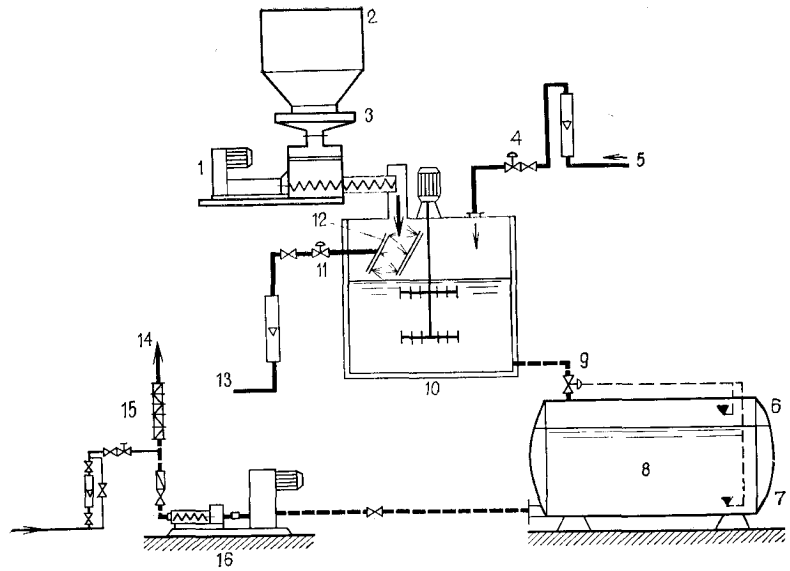


Рис. 16.29. Схема автоматического дозирования полимера с распыляющими форсунками

1 — питатель для сухого продукта; *2* — бункер на суточную потребность в полимере; *3* — экстрактор; *4* — автоматическая задвижка; *5* — вода для приготовления раствора; *6* — высокий уровень; *7* — низкий уровень; *8* — емкость для созревания исходного раствора полимера; *9* — автоматическая задвижка; *10* — емкость для приготовления раствора полиэлектролита; *11* — автоматическая задвижка; *12* — форсунки; *13* — вода для форсунок; *14* — к трубопроводу осадка; *15* — колонна для разбавления; *16* — дозирующий насос; *17* — разбавляющая вода

80% беззольного вещества) часто требует сильного катионного полимера с высокой молекулярной массой. Выше было показано, что для кондиционирования в большинстве случаев расход полиэлектролитов составляет 0,3—2 кг безводного полимера на 1 т сухого минерального осадка и 2—7 кг на 1 т органического осадка.

Полиэлектролиты поставляют в виде порошка или очень вязкого раствора. Перед введением в осадок их необходимо сильно разбавить. Для большинства полиэлектролитов удовлетворительной концентрацией исходного раствора является концентрация от 0,3 до 1% с оптимумом 0,5%.

Приготовление сравнительно концентрированного и вязкого исходного раствора позволяет избежать хранения больших количеств разбавленных растворов и применения высокопроизводительных и дорогостоящих насосов-дозаторов. Кроме того, слишком разбавленные растворы полиэлектролитов портятся очень быстро (0,1%-ный раствор через 1—2 сут).

Раствор готовят, орошая (или распыляя) безводный полимер (в этом нет необходимости в случае вязкой жидкости, в которой содержание активного продукта часто ограничено 15—20%). Эта первая операция, которую часто проводят вручную,

должна быть выполнена с осторожностью, чтобы избежать образования комков. Ее осуществляют с помощью специально приспособленных эжекторов или, при больших расходах, с помощью форсунок-дозаторов порошка. Инжекцию жидкого полиэлектролита предпочтительно проводить, перекачивая его из емкости исходного раствора поршневыми или эксцентриковыми насосами.

На больших станциях приготовление раствора может быть автоматизировано. Полимер забирается из бункера, оборудованного питателем для сухого продукта (или перекачивающей системой, пригодной для вязких продуктов). Созревание исходного раствора — это вторая стадия приготовления, которая длится от одного и более часов (в случае безводного продукта), прежде чем он будет готов к использованию. Исходный раствор разбавляют в питающем трубопроводе непосредственно перед инжекцией его в осадок.

Флокуляция с полиэлектролитами, как правило, мгновенна: образовавшийся хлопок объемистый, но довольно слабый. Точка ввода поэтому обычно расположена почти непосредственно перед обезвоживающим аппаратом, перемешивание должно быть сильным, но кратковременным.

16.6.2. ТЕПЛОВОЕ КОНДИЦИОНИРОВАНИЕ

Связь между водой и коллоидным веществом может быть также разрушена тепловыми методами: повышением или понижением температуры.

16.6.2.1. Тепловая обработка осадка. Идея применения тепловой обработки осадка возникла в начале этого века. Современный технический процесс был впервые введен английским инженером Портеусом в 1935 г. С тех пор вносилось много усовершенствований в применяемое оборудование и разрабатывались различные тепловые процессы кондиционирования.

Физическая структура осадка необратимо изменяется при нагревании его до достаточно высокой температуры (особенно если он содержит большую долю органических веществ и коллоидов). Осадок нагревают до температуры 160—210° С и поддерживают ее в течение 30—60 мин в зависимости от типа обрабатываемого осадка и последующего метода сушки.

Во время нагревания коллоидный гель разрушается. Одновременно протекают два процесса: растворение некоторых суспендированных веществ (например, крахмал гидролизуется с образованием сахаров) и осаждение соединений из раствора (например, глюкоза). Жиры остаются сравнительно стабильными. Целлюлоза разрушается слабо. В табл. 16.7 приведены изменения в составе осадка городских сточных вод, нагретого до 180° С в течение разного времени и показано, как трансформируются основные компоненты осадка под влиянием нагревания.

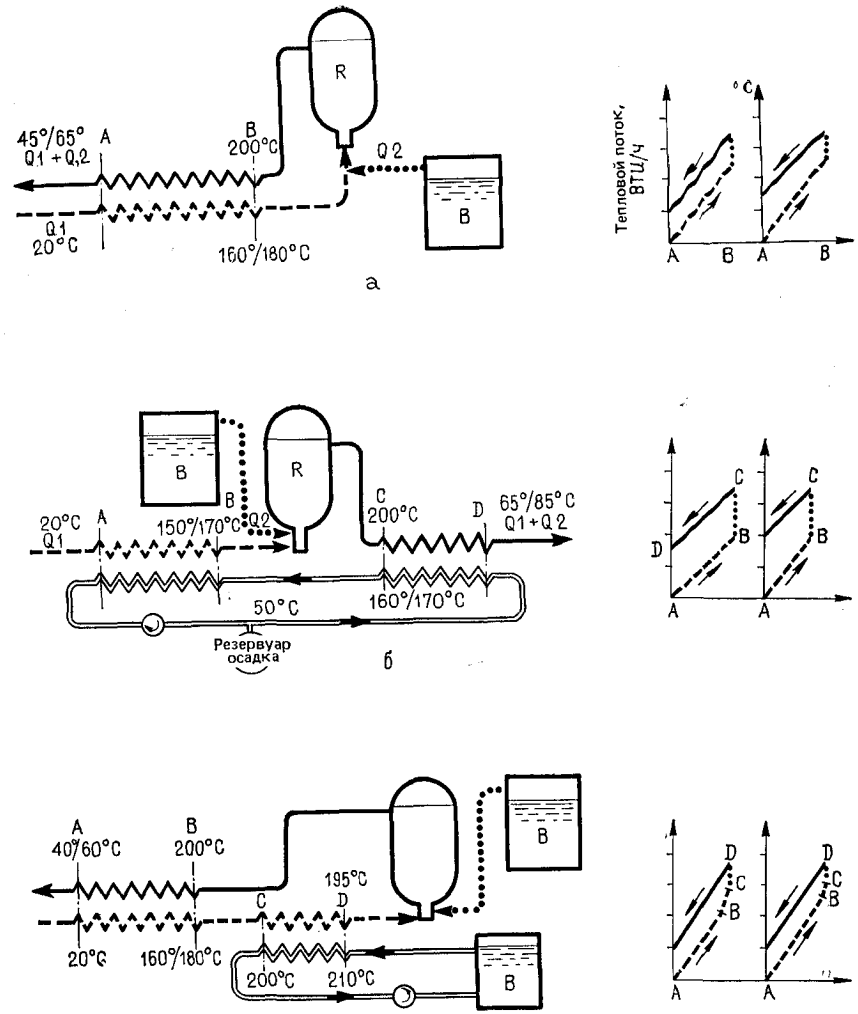


Рис. 16.30. Схемы работы установки для тепловой обработки осадка

а — один теплообменник «осадок—осадок» + источник пара; *б* — два теплообменника «осадок—вода», источник пара; *в* — теплообменник «осадок—осадок» + теплообменник «осадок — неиспаряющаяся жидкость» + источник пара. Условные обозначения: — горячий осадок; — — — — холодный осадок; ..... пар; = вспомогательная вода или жидкость

Доля летучих кислот в иловой воде (фильтрате) осадка после тепловой обработки составляет от 15 до 35% массы беззольного вещества; это значение выше для свежего осадка, чем для сброженного. В то же самое время доля аминокислот колеблется от 60 до 65% и выше для сброженного осадка.

ТАБЛИЦА 16.7

Температура, °С	Время обработки мин	В % на беззольное вещество осадка			
		жиры	углеводы	белки	прочее
180	10	51,2	44	3,35	1,45
180	75	47,4	47,6	3,7	1,30

Количество летучих кислот и аминокислот в фильтрате возрастает с повышением температуры обработки. При тепловой обработке в раствор переходит около 25% веществ осадка, описываемых величиной ХПК, и образуется фильтрат с концентрацией по $БПК_5$ около 2000—3000 мг/л для сброженного осадка городских сточных вод и 5000 мг/л для сырого осадка того же происхождения.

Количество азота в жидкой фазе сравнительно высоко (0,5—1 г/л в пересчете на NH_4^+), фосфор, напротив, остается в осадке. То же самое относится к тяжелым металлам.

Основные преимущества теплового кондиционирования:

универсальный метод, пригодный для всех органических осадков;

легко управляемый;

достигается стерилизация осадка;

получаемый осадок может быть быстро уплотнен в гравитационных уплотнителях и легко обезвожен;

не требуются реагенты.

Для осадка городских сточных вод, обработанного при температуре 180—200° С, можно путем отстаивания достичь концентрации 150 г/л и выше. Структура осадка настолько улучшается, что становится возможной его фильтрация без добавки реагентов. Кроме того, образующийся при обезвоживании кек имеет меньшую влажность, чем при химическом кондиционировании.

Фильтруемость осадка улучшается с увеличением температуры и времени обработки. Температура при этом является доминантным фактором (в основном одинаковые результаты получены, если осадок нагревали в течение 1 ч при 180°, 30 мин — при 190° С и 15 мин — при 200° С). Короткий период нагрева улучшает качество фильтрата.

Кривые на рис. 16.31 показывают характер изменения удельного сопротивления осадка в результате обработки при разных температурах в течение различного времени.

Повышение способности к фильтрации, полученной после нагревания осадка, зависит от содержания органических веществ в осадке. Фильтруемость свежего осадка городских сточных вод после тепловой обработки, как правило, лучше, чем

сброженного, обработанного в тех же самых условиях (но объем осадка, подлежащего обработке, обычно больше примерно на 30%). Сочетание процесса анаэробного сбраживания с тепловой обработкой, тем не менее, очень выгодно, так как избыток газа, образующегося при сбраживании, обеспечивает бóльшую часть тепла, которое требуется для установки теплового кондиционирования. К тому же текучесть и высокая гомогенность сброженного осадка и высокая стабильность его означают, что теплообменник может быть технологически более простым и менее дорогим. Наконец, значительный объем метантенков гарантирует стабильность работы тепловой установки.

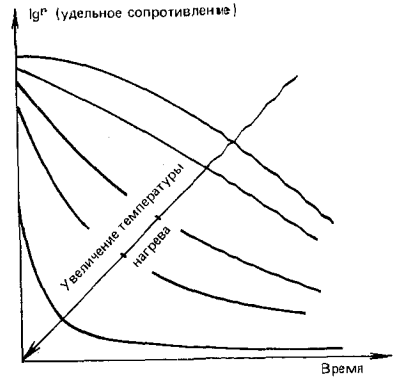


Рис. 16.31. Сравнительное влияние времени и температуры нагрева на удельное сопротивление осадка

Тепловая обработка осадка имеет следующие недостатки:

образуется высококонцентрированная иловая вода;

возникает необходимость в защите от запаха, образующегося главным образом из-за неконденсирующихся газов, выпускаемых из реактора, и пара от нагретого осадка в уплотнителе;

высокие капитальные затраты на установку, использующую передовую технологию.

16.6.2.2. Технология тепловой обработки осадка. Принципиальная схема эксплуатации установки по тепловой обработке осадка приведена на рис. 16.30. Во всех случаях предусмотрена максимально возможная утилизация тепла обработанного осадка для предварительного подогрева осадка, поступающего на установку. В итоге действительная потребность в тепле эквивалентна тому количеству тепла, которое необходимо для увеличения температуры осадка примерно на 50 °С. Утилизацию тепла осуществляют в основном в трубчатых теплообменниках, работающих по принципу противотока, хотя делались попытки предварительно нагревать осадок прямым контактом, что приводит к увеличению объема обрабатываемого осадка. Всегда выгодно иметь изолированный реактор, обеспечивающий максимальное время нагрева при соответствующей температуре, которую можно контролировать.

Требуемая тепловая энергия может быть введена либо прямой инжекцией острого пара в реактор, либо за счет нагревания осадка паром или перегретой водой в теплообменнике. Хотя теоретически метод прямой инжекции пара в реактор не является самым экономичным с точки зрения затрат энергии, он имеет

большие преимущества, так как обеспечивает температуру нагрева несмотря на возможное забивание теплообменника для нагрева осадка, при этом не требуется увеличивать длину теплообменника.

Если осадок содержит некоторую часть гетерогенных примесей, плохо стабилизированных или не стабилизированных совсем, его рекомендуется предварительно нагревать в теплообменниках с промежуточной жидкостью; во всех других случаях, например при использовании сброженного осадка, самым подходящим являются теплообменники с передачей тепла от обработанного осадка осадку, поступающему на установку.

Полный расход тепла колеблется в зависимости от схемы и условий работы теплообменников от 3300 до 6300 кДж/кг сухого вещества.

Неконденсирующиеся газы должны быть выпущены из реактора; они могут быть очищены или сожжены.

Желательно емкости для сбора осадка после тепловой обработки делать закрытыми или охлаждать их, чтобы предотвратить появление каких-либо запахов.

Сырой осадок на установку подается непрерывно поршневыми насосами высокого давления. Прогретый осадок удаляют с таким расчетом, чтобы уровень его в реакторе поддерживался достаточно постоянным. Давление в паровом котле обычно составляет 1,5—2,5 МПа.

Иловая вода, отделившаяся от осадка, после теплового кондиционирования может быть:

разлита на сельскохозяйственные поля;

возвращена в начало очистных сооружений или в буферную емкость — накопитель, откуда может перекачиваться на сооружения биологической очистки в период низкой нагрузки;

передана на отдельные сооружения биологической очистки, представляющие собой сооружения ограниченного объема, но тем не менее рассчитанные на значительное время пребывания, так как иловая вода имеет высокую концентрацию органических загрязнений. Это может быть аэротенк или биофильтр с пластмассовой загрузкой. Время аэрации в аэротенке около 24 ч, при этом достигается снижение $БПК_5$ на 96—98%. Требуется добавка фосфора либо в виде солей, либо разбавлением стока предварительно отстоенной сырой сточной водой. В последнем случае объем аэротенка возрастает.

16.6.2.3. Мокрое сжигание. Первоначально этот метод состоял в нагревании осадка в присутствии воздуха при давлении 20 МПа. Органические вещества полностью окислялись, а коллоидные примеси одновременно физически трансформировались. Метод постоянно развивался в основном в направлении определения давления, при котором влияние воздуха незначительно. В итоге были получены те же результаты, что и при тепловой обработке осадка.

Тепловая обработка и мокрое сжигание позволяют получить дезинфицированный осадок, в котором все патогенные микробы, яйца гельминтов, вирусы и т. д. разрушены. Этот осадок, выгруженный на открытые площадки, не загнивает и не дает неприятных запахов.

16.6.3. ДРУГИЕ МЕТОДЫ КОНДИЦИОНИРОВАНИЯ

16.6.3.1. Замораживание. Полное затвердение осадка в результате замораживания позволяет уменьшить количество связанной воды, заключенной в осадке, вследствие перегруппировки его частиц. Эта перегруппировка приводит к образованию тонких пластинок, которые остаются сравнительно стабильными после таяния льда.

Фильтруемость осадка улучшается, и он более легко отдает воду. При разбрызгивании осадка городских сточных вод слоем в 5 см после замораживания в течение 24 ч может быть достигнута влажность 80%.

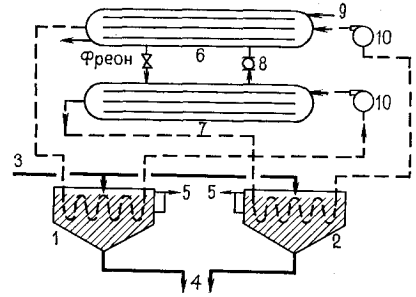
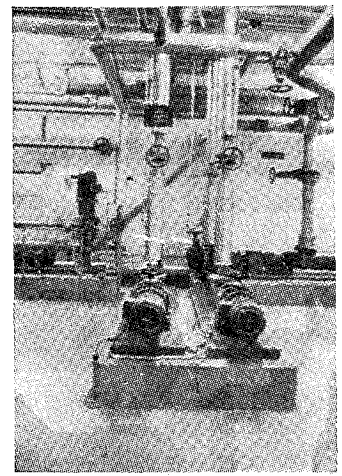


Рис. 16.32. Схемы работы установки для замораживания осадка

1 — резервуар для подогрева; *2* — резервуар для замораживания; *3* — подача осадка на замораживание; *4* — отвод иловой воды; *5* — отвод замороженного осадка на обезвоживающую установку; *6* — охладитель; *7* — холодильник; *8* — компрессор фреона; *9* — насос гликола; *10* — циркуляционные насосы



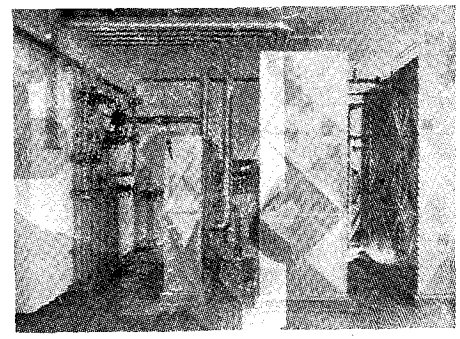


Рис. 16.33. Непрерывнодействующая установка пастеризации осадка в Ромоне, Швейцария

Осадок промораживают от 1 до 4 ч при температуре минус 10—20° С.

Одна из возможных схем замораживающей установки показана на рис. 16.32.

В случае применения органических осадков эффективность замораживания значительно увеличивается в результате предварительного химического кондиционирования.

Метод замораживания пока используется мало. Его применяют главным образом для минеральных осадков от обработки питьевой и промышленной воды. Эти установки пока еще сравнительно дороги, несмотря на умеренные капиталовложения. Они, очевидно, будут пригодны для станций средней производительности и преимущественно в сочетании с системой механической фильтрации.

Сырой осадок бытовых сточных вод, оттаивая после замораживания, очень быстро загнивает, образуя дурнопахнущие газы.

16.6.3.2. Кондиционирование с помощью инертных добавок. Когезия осадка и, следовательно, его фильтруемость улучшаются при добавлении сухого инертного вещества. Кроме того, уменьшается сжимаемость. Это приводит к увеличению содержания сухого вещества в обезвоженном кеке и облегчает его перевозку, но не сказывается существенно на производительности обезвоживающей установки.

В качестве добавки могут быть зола (возвращенная из печи сжигания осадка), опилки, кизельгур, бумажные волокна, карбонат кальция и т. д.

Зола имеет следующие недостатки: значительно возрастает доля негорючих веществ в кеке, опасность затвердения осадка внутри труб, транспортирующих его и опасность истирания.

При использовании волокнистых добавок легкие частицы, как правило, не отделяются и степень загрязнения иловой воды остается высокой.

16.6.3.3. Кондиционирование с помощью растворителей. Некоторые растворители типа алифатических аминов имеют очень непостоянную растворимость в воде при незначительных изменениях температуры. В таком случае оказывается возможным более легкое отделение сухого вещества, содержащегося в воде, механическими способами, тогда как бо́льшая часть растворителя регенерируется.

17. ОБЕЗВОЖИВАНИЕ, СУШКА И СЖИГАНИЕ ОСАДКОВ

17.1. ОБЕЗВОЖИВАНИЕ

17.1.1. ФИЛЬТРОВАНИЕ

17.1.1.1. Характеристика фильтруемости. До сих пор фильтрование считается самым распространенным методом обезвоживания осадков, которые образуются при обработке природных и сточных вод. Оно может заключаться в дренировании иловой воды через слой песка, либо быть «механическим» под вакуумом или под давлением. Для механического обезвоживания требуется сложное оборудование.

Практика показывает, что хотя осадки обычно представляют собой чрезвычайно сложные смеси, результаты теоретических исследований закономерностей фильтрования с образованием осадка на фильтрующей поверхности позволяют вывести математические зависимости, которые достаточно хорошо подтверждаются на реальных осадках.

Удельное сопротивление r фильтрации осадка (см. с. 83) определяют как сопротивление, оказываемое фильтрации (или прохождению фильтрата) количеством кека, отложившимся на 1 м^2 поверхности фильтра и содержащим 1 кг сухого вещества. Общие законы, определяющие процесс фильтрования через фильтрующую поверхность, приводят к следующему основному выражению:

$$\frac{dV}{dt} = \frac{PS^2}{\eta r C V}.$$

Интегрирование этой зависимости при условии постоянства давления дает упрощенное уравнение

$$\frac{t}{V} = \frac{\eta C r}{2PS^2} V = aV,$$

где t — время, с; V — объем фильтрата, полученный за время t, м^3; η — динамическая вязкость фильтрата (при комнатной температуре η приблизительно равна $1{,}1 \cdot 10^{-3}$ Па·с); C — концентрация сухого вещества в осадке, кг/м^3; S — площадь фильтрования, м^2; P — градиент давления, Па; r — удельное сопротивление при давлении P, м/кг.

При выводе этого упрощенного уравнения сделано несколько допущений, в частности:

сопротивление фильтрующего материала R_m пренебрежительно мало по сравнению с удельным сопротивлением r кека (за исключением случаев кольматажа); для большинства осадков (за исключением очень плотных суспензий) W (см. 82) с очень незначительной ошибкой может быть заменено на C_x — концентрацию сухого вещества в жидком осадке.

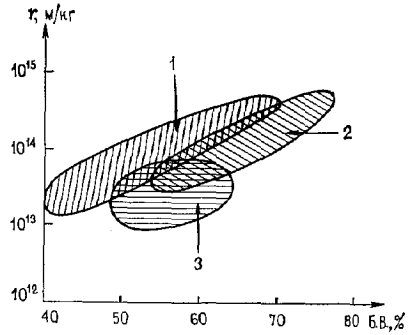


Рис. 17.1. Удельное сопротивление r осадков городских сточных вод

1 — сброженный осадок; *2* — осадок из первичных отстойников + активный ил; *3* — осадок из первичных отстойников

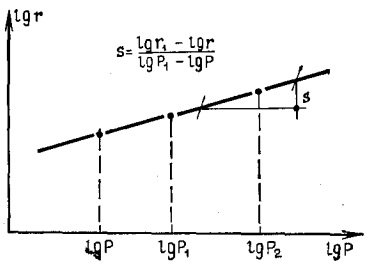


Рис. 17.2. Определение коэффициента сжимаемости s

Способность осадков к фильтрованию оценивается по «кривой фильтрования», которую получают на основании лабораторного опыта при известном перепаде давления (рис. 3.19 и 17.4). Она представляет собой прямую линию с наклоном a. Коэффициент фильтруемости осадка под влиянием давления P равен:

$$r = 2aPS^2/\eta C.$$

Удельное сопротивление (или коэффициент фильтруемости осадка при перепаде давления 0,05 МПа) — основная величина, наилучшим образом характеризующая осадок. Цель кондиционирования — снизить ее значение для того, чтобы ускорить фильтрование.

На удельное сопротивление влияет процентное содержание гидрофильных коллоидных веществ в осадке. Для осадков сточных вод доля коллоидных веществ линейно зависит от процентного содержания беззольного вещества в осадке. На рис. 17.1 показаны для сравнения области удельного сопротивления, характерные для сброженного и сырых осадков. Удельное сопротивление осадка теоретически не зависит от большинства условий обезвоживания, оно является характеристикой самого вещества осадка, независимо от его концентрации.

Сжимаемость осадка (рис. с. 83). С увеличением перепада давления поры кека исчезают, таким образом возрастает сопротивление фильтрации. Коэффициент сжимаемости осадка связан с коэффициентом фильтруемости следующим выражением:

$$r = 2^S r_{0,5} P^S = r' P^S.$$

Скорость фильтрования будет увеличиваться, оставаться постоянной или уменьшаться при увеличении P, в соответствии с тем будет ли значение S, определенное графически наклоном прямой линии $\lg\frac{r}{r_1}=S\lg P$ (рис. 17.2), меньше, равно или больше единицы.

Нерастворимые кристаллические и морфологические родственные им вещества (например, осадок искусственно приготовленный из частиц водоотталкивающих веществ) обычно сжимаются с трудом (S близко к 0 или меньше 0,3). Суспензии с гидрофильными частицами (органические осадки, гелеподобные гидроксиды) имеют коэффициент сжимаемости больше 0,5, достигающий, а иногда даже превышающий единицу (например, чистый активный ил с большим содержанием белка).

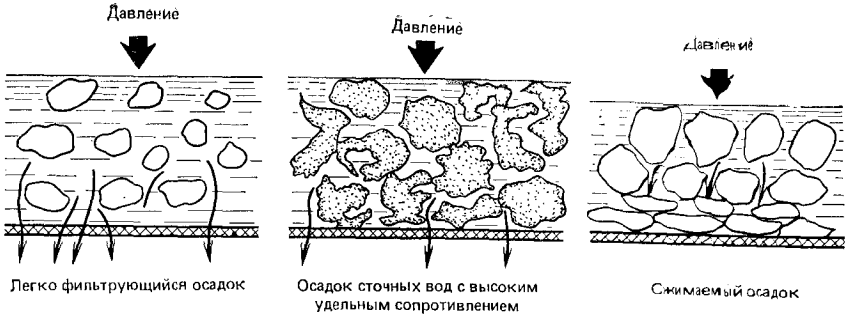


Рис. 17.3. Диаграммы структур различных типов осадков

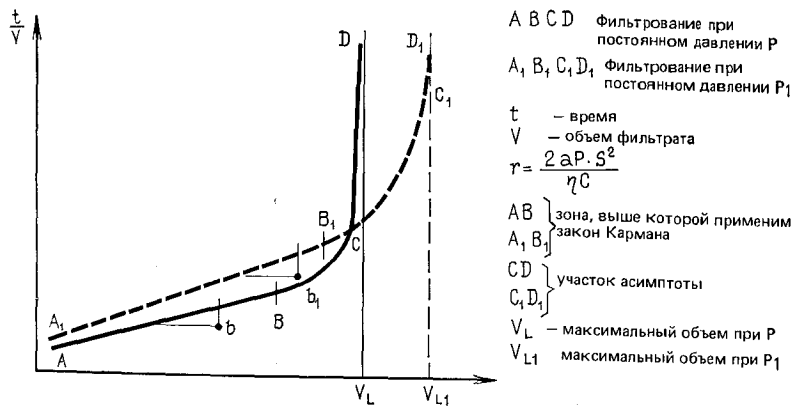


Рис. 17.4. Фильтрация при различных давлениях

Для многих видов органических осадков существует даже «критическое давление», выше которого поры кека закрываются настолько, что дренирование становится невозможным. Например, для осадка городских сточных вод фильтрование под давлением выше 1,5 МПа почти безрезультатно. Вот почему полагают, что постепенное увеличение давления имеет некоторые преимущества, задерживая уплотнение кека.

Диаграммы на рис. 17.3 иллюстрируют структуру различных типов осадков.

Максимальное содержание сухого вещества в кеке. Когда осадок фильтруется при значительном перепаде давления (0,5—1,5 МПа), кривая фильтрования $t/V = f(V)$ имеет характерный вид, показанный на рис. 17.4.

Она состоит из трех участков:

прямой линии AB, выше которой справедлив основной закон фильтрования, как в случае небольшого перепада давлений (например, 0,05—0,1 МПа). Наклон этой прямой легко определяется из графика;

участка асимптоты CD, выше которого увеличение времени фильтрования не сопровождается дальнейшим увеличением объема фильтрата. Эта «блокада» — результат комплекса явлений, таких как различное уплотнение кека, увеличение вязкости фильтрата, засорение фильтрующей среды, деформация уплотненного вещества под действием давления;

промежуточного участка BC различной длины.

Содержание сухого вещества в кеке после неограниченного времени фильтрования стремится к максимальному значению S_L. Максимальный объем фильтрата V_L — есть логарифмическая функция P. Кривая Кармана, дополненная участком асимптоты, выражается следующим уравнением:

$$\frac{t}{V} = aV + \frac{KV}{(V_L - V)V_L}.$$

Вычерчивая кривую $S_L = f(P)$, можно определить в случае фильтрования под большим давлением давление, которое должно быть создано для получения требуемого содержания сухого вещества в кеке. Выбранное давление должно быть таким, чтобы рабочая точка лежала ниже точки C для поддержания приемлемых условий эксплуатации (достаточная скорость фильтрования).

Максимум содержания сухого вещества в кеке обратно пропорционален содержанию коллоидных веществ в осадке.

17.1.1.2. Иловые площадки. До последних лет для подсушки осадка чаще всего использовали площадки с песчаным основанием и дренажем. Их еще применяют на очистных станциях средней производительности (хотя при этом требуются большие земельные площади и затраты труда) и на некоторых больших станциях при благоприятных климатических условиях.

Из соображений санитарной безопасности метод естественного обезвоживания пригоден лишь для хорошо стабилизированных, не пахнущих осадков. Эффективность его обычно низкая, так как зависит от погодных условий, особенно в странах с умеренным климатом.

На дно иловых площадок обычно укладывают слой гравия (крупностью зерен 15—20 мм) высотой 20 см, поверх которого насыпают песок (0,5—1,5 мм) слоем в 10 см. Дренаж, который

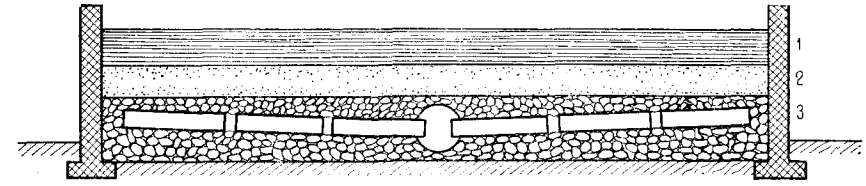


Рис. 17.5. Поперечный разрез иловой площадки
1 — осадок; *2* — песок; *3* — гравий

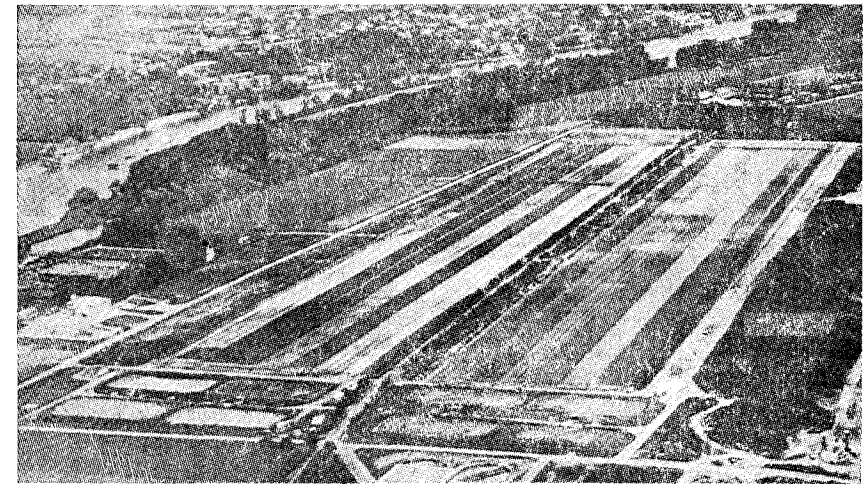


Рис. 17.6. Иловые площадки (20 га) с механизированными мостиками для разлива и уборки осадка. Станция очистки сточных вод Ашер II, Париж, Франция

укладывают под гравием, обычно состоит из разъемных цементных или керамических трубок в случае агрессивных осадков.

Трубы укладывают с соответствующим уклоном; их количество должно быть достаточным, чтобы обеспечить равномерный дренаж всей массы осадка (рис. 17.5). Осадок наливают слоем около 30 см. Если этот слой слишком большой, песок быстро забивается. Когда осадок на площадку подается сосредоточенно (в одной точке), ширина ее не должна превышать 8 м, а длина 20 м.

Процесс обезвоживания на иловых площадках осуществляется в две стадии. На первой стадии происходит обезвоживание дренированием или фильтрацией при очень небольшом давлении. Таким путем из осадка удаляется свободная вода и влажность его снижается до 80% в случае осадков бытовых сточных вод. На второй стадии происходит испарение части связанной



Рис. 17.7. Иловая площадка через 8 сут после заполнения осадком с добавкой полимера (на переднем плане) и без него (в середине)

воды. При атмосферной сушке содержание сухого вещества в осадке может повыситься до 65% в зависимости от времени сушки, погодных условий и свойств осадка.

Высушенный осадок чаще всего удаляют вручную. Этого можно избежать при оснащении площадок (рис. 17.6) механизированными мостиками, оборудованными скрепером и механизмом для удаления осадка. При условии механизации уборки предпочтительнее применять площадки большей площадью. Устройство механизированного мостика позволяет разливать жидкий осадок по всей площади сушки. С другой стороны, заметно возрастают капиталовложения, так как при этом необходимо дополнительно использовать весьма сложное оборудование и укреплять поддерживающие стенки. Для сушки осадков сточных вод (в районах Средиземноморья) на площадках традиционного типа, оборудованных хорошим дренажем, допускаются следующие нагрузки (при сушке в течение месяца):

Вид осадка	*Нагрузка по сухому веществу на 1 м² в сутки, кг*
Сброженный	0,4—0,6
Стабилизированный	0,3—0,5

Нагрузка на иловые площадки существенно зависит от климата. Частота заполнения площадок в некоторых областях с умеренным морским климатом может быть 3—4 раза в год; разлив иногда прекращают на всю зиму. Производительность площадок может быть повышена путем химического кондиционирования (используют в основном полиэлектролиты). Этим, легко осуществимым процессом флокуляции с полимерами можно значительно увеличить скорость дренирования.

Очень холодная погода может быть полезной для работы иловых площадок, если осадок замерзает, но промораживание должно быть равномерным по всей массе осадка. Это очень редко приводит к повышению эффективности, так как погодные условия не часто соответствуют теоретически желаемой последовательности периодов замораживания и таяния.

Ради полноты изложения должны быть упомянуты и другие процессы, посредством которых может быть повышена эффективность, но которые применимы при определенных условиях (в частности, когда влажность осадка меньше 90%) и используются ограниченно, например, сбалансированный дренаж и электроосмос. Для небольших количеств производственных осадков (гидроксиды металлов, осадки от обработки металлических поверхностей, флокулированные полиэлектролитами) иногда применяют сушку на стальных дренированных секциях специальной формы (высокие капвложения).

ТАБЛИЦА 17.1

Тип осадка	Концентрация, % исходная	Концентрация, % сухого вещества после уплотнения
Из первичных отстойников:		
свежий	6—10	18—23
сброженный	6—8	17—22
Смесь свежих осадков	3,5—6	13—17
Сброженная смесь	3,5—6	13—16
После аэробной стабилизации	1,5—2,5	8—13
После осветления речной воды (сульфат алюминия, немного ила)	0,1—0,2	5—8
После декарбонизации воды из скважин	3—6	35—45

17.1.1.3. Фильтрующие мешки простой конструкции применяют на маленьких станциях для вывоза или разлива осадка на поля. Осадок, обработанный полиэлектролитами, загружают в подвешенный мешок из синтетической ткани, снабженный дополнительной центральной дренажной колонкой. Эти мешки (вместимостью 2,5 м³, высотой и диаметром 1 м) дают устойчивую и значительную концентрацию осадка в результате простого дренирования. Образуется фильтрат хорошего качества. В зависимости от исходного содержания сухого вещества в мешок на один цикл может быть загружено от 5 до 15 м³ осадка.

Достигаемая степень уплотнения зависит от природы осадка и времени обработки, которое колеблется от 6 до 24 ч (табл. 17.1).

Такое быстрое уплотнение дренированием пригодно также для непредвиденных случаев зимой при обслуживании маленьких станций или с целью уменьшения объема жидкого осадка, подлежащего перевозке.

17.1.1.4. Вакуум-фильтрование. Вакуум-фильтр — это самый старый тип установки непрерывного действия для механического обезвоживания. Наиболее часто его применяют для обезвоживания осадков от обработки воды. Он состоит из вращающегося барабана и открытого корыта. Иногда могут использоваться и другие фильтры, например дисковые, вакуумные ленточные, горизонтальные в виде плит и бумажные, которые обычно применяются в химической, бумажной и угольной промышленности.

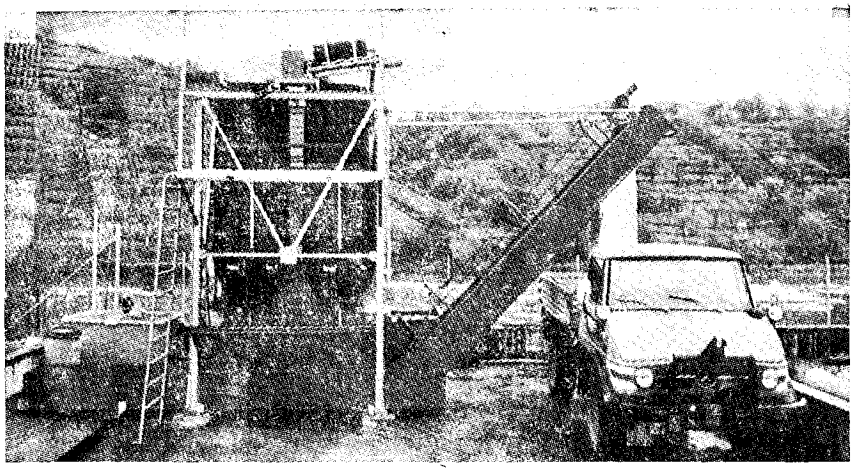


Рис. 17.8. Установка с фильтрующими мешками для обезвоживания осадка

Способ работы. Вращающийся барабанный фильтр состоит из вращающегося цилиндра (или барабана), частично погруженного в емкость (или корыто), в которую подается осадок. Барабан образован несколькими камерами (или секторами), которые непосредственно примыкают друг к другу, но изолированы; барабан покрыт фильтрующей тканью. Каждый сектор связан трубой с основным устройством, известным как распределитель.

Фильтрование происходит в такой последовательности. В зоне *A* секторы через распределитель подсоединяют к источнику вакуума. Фильтрат удаляется из системы через разделительный сосуд. Вещества, задержанные на ткани, накапливаются и образуют слой уплотненного кека.

В зоне *B* происходит обезвоживание, продолжается дренаж кека без дополнительного наслоения осадка; секторы при этом соединены с вакуум-насосом (в случае необходимости перепад давления может быть больше, чем в предыдущих секторах).

В зоне *C* осуществляется разгрузка подачей сжатого воздуха и скребком; параллельно навитой проволокой или цепью; нажимным роликом, который также способствует обезвоживанию, создавая дополнительное давление; сходящей фильтрующей тканью. В последнем случае фильтровальная ткань полностью отделяется от барабана (рис. 17.10). Изменение кривизны натяжения ткани способствует отделению кека, кроме того, как дополнительная мера предусмотрен скребок.

Осадок фильтруется непрерывно под вакуумом 34—78 кПа. Толщина слоя кека изменяется от 5 до 20 мм. При высоком удельном сопротивлении осадка на фильтрах со сходящим полотном толщина слоя кека уменьшается. В этих фильтрах возможна непрерывная промывка ткани водой под давлением 0,3—0,4 МПа, что значительно снижает вероятность засорения фильтрующего материала.

В производственных фильтрах кек формируется за несколько минут. Частота вращения барабана 8—15 об/ч.

Если осадки жирные, маслянистые или очень малоконцентрированные и легко забивают ткань, целесообразно предварительно наносить на ткань подстилающий слой (рис. 17.11). В этом случае все секции фильтра подключают к вакуум-насосу. Перед пуском фильтра в эксплуатацию на поверхность его наносят подстилающий слой толщиной 50—80 мм из материалов соответствующей пористости, таких как инфузорная земля, древесная мука, зольная пыль и т. д. Очень жесткий скребок, регулируемый с помощью микрометра, установлен так, что он снимает вместе с леком пленку с подстилающего слоя, постоянно поддерживая чистой фильтрующую поверхность.

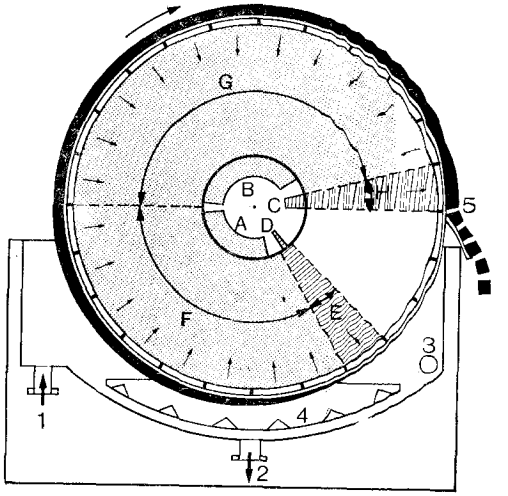


Рис. 17.9. Основные фазы цикла работы вакуум-фильтра

1 — подача осадка; *2* — опорожнение; *3* — перелив; *4* — мешлака; *5* — снятие кека с помощью скребка; *6* — промывка ткани; *7* — зона фильтрации; *8* — зона обезвоживания; *9* — отдувка кека; *10* — секторы фильтра, находящиеся под действием вакуума; *11* — секторы фильтра, к которым подводится сжатый воздух

Все известные в настоящее время фильтрующие ткани изготовлены из искусственных волокон. Они должны иметь как можно более равномерное переплетение нитей с размером свободных ячеек до 100 мкм. Вместо фильтрующей ткани можно использовать двойной слой металлических сеток с наружной промывкой. Это устройство, идеальное с точки зрения предотвращения забивания фильтрующего материала, имеет серьезный недостаток: образуется очень грязный фильтрат вследствие слишком больших ячеек, тогда как при использовании фильтровальных тканей получается чистый фильтрат с концентрацией сухого вещества менее 300 мг/л.

Фильтры с металлическими сетками трудно эксплуатировать на неволокнистых или маловолокнистых осадках, когда их производительность становится непредсказуемой.

Производительность установки. На практике используется

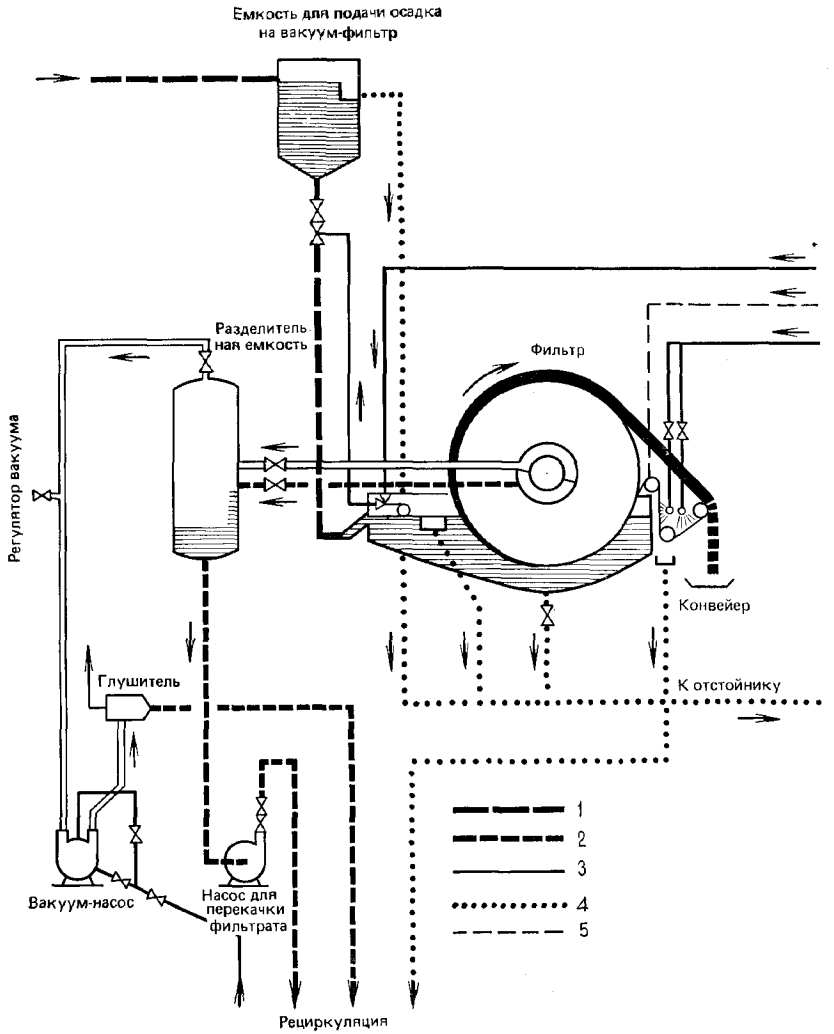


Рис. 17.10. Схема вращающегося вакуум-фильтра со сходящим полотном

1 — подача осадка; *2* — фильтрат; *3* — вода под давлением, промывка; *4* — перелив и опорожнение; *5* — сжатый воздух

понятие производительности фильтра: она определяется в лабораторных условиях и выражается в кг сухого вещества, остающегося на 1 м² фильтрующей поверхности за 1 ч.

Производительность фильтра 10—30 кг/(м²·ч), например, для осадков городских сточных вод соответствует значениям $r_{0,5}$ от 10^{11} до $5 \cdot 10^{11}$ м/кг для осадков обычной концентрации от 3 до 8% по сухому веществу.

Производительность вакуум-фильтра L теоретически можно

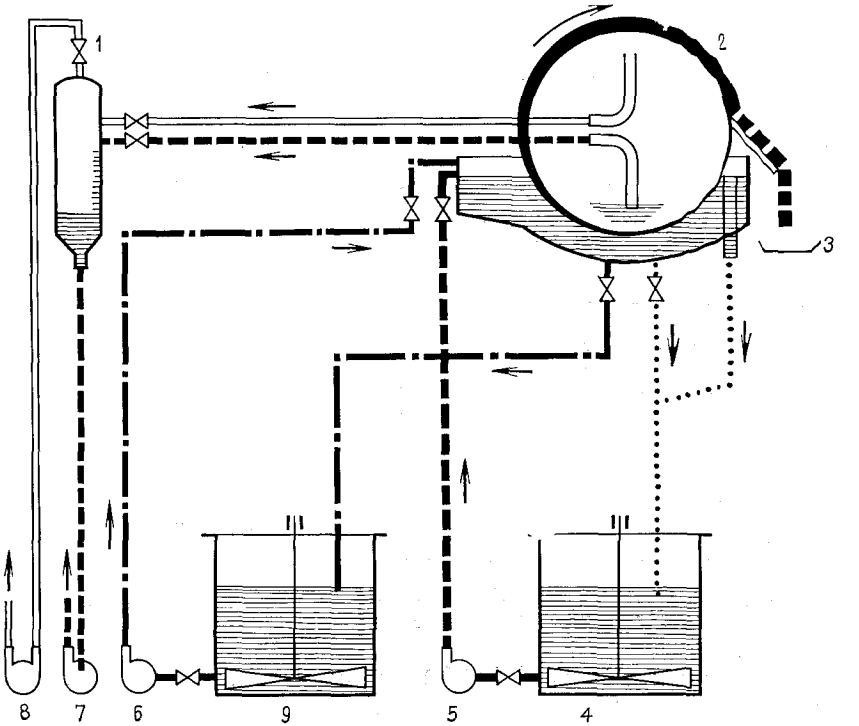


Рис. 17.11. Схема работы вращающегося вакуум-фильтра с подстилающим слоем

1 — разделительная емкость; *2* — фильтр; *3* — конвейер; *4* — кондиционирование осадка; *5* — насос осадка; *6* — насос для перекачки материала, образующего подстилающий слой; *7* — насос фильтрата; *8* — вакуум-насос; *9* — приготовление материала для подстилающего слоя

Условные обозначения: — — — осадок на обезвоживание, ——— фильтрат; — . — . — материал для подстилающего слоя, ... перелив и опорожнение

определить интегрированием уравнения Кармана по времени эффективного фильтрования $t_f = nT$ (где T — продолжительность полного оборота барабана, а n — степень погружения барабана):

$$L = K\left[\frac{2PCn}{\eta r T}\right]^{\frac{1}{2}} \frac{1 - W_b}{1 - \frac{W_b}{W_g}},$$

где K — поправочный коэффициент, зависящий, в частности, от сопротивления фильтрующей среды (K — обычно принимается равным 0,75—0,85); P — величина вакуума, обычно 49 кПа; r — удельное сопротивление фильтрации кондиционированного осадка при разрежении P (легко определяется на воронке Бюхнера в лабораторных условиях); W_b, W_g — см. определения на с. 83 (выражается в долях); C — концентрация сухого вещества в кондиционированном осадке; n — степень погружения барабана (от 0,25 до 0,40).

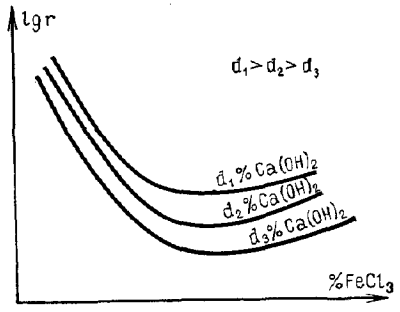


Рис. 17.12. Изменение удельного сопротивления lg r осадка в зависимости от условий кондиционирования

Эта зависимость хорошо подтверждается в производственных условиях. Она определяет производительность при условии высокой концентрации осадка ($L = K\sqrt{C}$) и поддержания чистоты фильтрующего материала (коэффициент K); последнее условие легко осуществляется на фильтрах со сходящим полотном и непрерывной промывкой.

Оценка степени химического кондиционирования осадка. Степень кондиционирования можно приблизительно оценить, проведя серию опытов с применением воронки Бюхнера или специальной лабораторной ячейки, подключенной к источнику вакуума — водоструйному насосу (кек может быть обезвожен за 2—4 мин). Более точную оценку можно получить на том же оборудовании, вычерчивая (по результатам опытов) кривые фильтрования $t/V = f(V)$ и зависимости удельного сопротивления r от условий кондиционирования.

Серия кривых $\lg r = f(FeCl_3)$ для частного случая обработки осадка различными дозами $Ca(OH)_2$ приведена на рис. 17.12.

Способ определения фильтруемости по капиллярному всасыванию, предложенный Гэлом и Баскервилем, может легко заменить способ оценки удельного сопротивления, например, на промышленной фильтровальной установке. Принцип измерения прост: пробу осадка наливают в цилиндрический сосуд без дна, установленный на бумажный абсорбент, который поглощает фильтрат за счет капиллярного всасывания. Время всасывания — это время (выраженное в секундах), за которое кольцо фильтрата передвигается на 1 см. Чем выше фильтруемость осадка, тем меньше это время. Для осадка определенной концентрации можно легко установить соотношение между временем всасывания и удельным сопротивлением, если только последнее не слишком низкое. Корреляция с $r_{0,5}$ лучше, если время всасывания сравнимо с $r_{0,5}C$. При проведении этого опыта должны быть приняты некоторые меры предосторожности (отбор проб, сохранность хлопка и т. д.).

Данный способ определения особенно пригоден при исследовании процесса химического кондиционирования неорганическими реагентами, тепловой обработке определенных осадков и при контроле работы фильтра.

В последнем случае этот способ оценки фильтруемости более ценен, чем универсальный, но трудоемкий метод замера удельного сопротивления.

Характеристика вакуум-фильтров. Результаты эксплуатации большого числа фильтров со сходящим полотном, работающих на различных видах бытовых и производственных осадков, приведены в табл. 17.2.

Вакуум-фильтры обычно не применяют для очень гидрофильных коллоидных осадков, потому что даже после интенсивного кондиционирования удельное сопротивление этих осадков остается выше 10^{12} м/кг.

Для химического кондиционирования неорганические реагенты предпочтительней органических. Для органических осадков в качестве реагентов рекомендуются соли железа в сочетании с известью, а для неорганических — главным образом, известь. Неорганические реагенты благоприятно влияют на сжимаемость, плотность и влажность образующегося кека.

При использовании полиэлектролитов возникает опасность растрескивания кека вследствие очень значительного снижения удельного сопротивления, трудно регулируемого в условиях производства. Кек становится таким толстым, что не может выдерживать свою собственную массу при вращении барабана и падает назад в корыто. В этом случае сила механической связи кека должна быть измерена в лабораторных условиях.

Эксплуатация вакуум-фильтров. Вакуум-фильтры барабанного типа могут иметь площадь фильтрующей поверхности до 50 м² и более. Вакуум-фильтрация — непрерывный процесс, который легко автоматизировать. Подача сырого осадка регулируется уровнем осадка в корыте фильтра или емкости для кондиционирования. Эта регулировка может быть непрерывной, но наиболее часто осуществляется отключением насосов или пневматических клапанов. Дозирующая система также регулируется по уровню.

Дальнейшая автоматизация возможна на основе изменений в концентрации сырого осадка. Количество реагентов определяют по расходу осадка и его концентрации. Для этой цели на трубопроводе сырого осадка следует установить электромагнитный расходомер и анализатор концентрации (например, гамма-лучевого типа).

Применяют кольцевые вакуум-насосы. Если вода, подаваемая к насосам, очень жесткая, а станция большой производительности, должно быть предусмотрено умягчение воды и снижение содержания карбонатов.

Фильтровальная ткань может служить до 3000 ч. В процессе эксплуатации она забивается отложениями карбонатов, поэтому периодически ее необходимо очищать. Для этого корыто фильтра наполняют раствором ингибированной соляной кислоты и ткань чистят щетками.

Фильтры могут быть изготовлены из самых разных материалов. Наиболее часто их делают стальными, но если осадок очень коррозионный или обезвоживание его вызывает особые трудно-

ТАБЛИЦА 17.2

Тип осадка	Источник образования	Характер осадка	Кондиционирование*		Производительность фильтрата на 1 кг сухого вещества, м²·ч	Содержание сухого вещества в кеке, %
			$FeCl_3$, %	CaO		
Органический гидрофильный	Бытовые сточные воды	Осадок из первичных отстойников	2—4	7—11	30—40	26—32
		Смесь свежих осадков	3—6	13—19	20—30	23—27
		Сброженная смесь	5—7	13,5—21	20—25	24—28
		Аэробностабилизированная смесь	7—12	22—37	15—20	18—20
		Смесь свежих осадков	Тепловая обработка при 180 °С в течение 40 мин		25—30	33—40
		Сброженная смесь			15—30	25—40
	Пивоваренный завод	Осадки от биологической очистки +10% осадка от декарбонизации	7	19	20—30	20—25
Волокнистый	Целлюлозно-бумажные предприятия	Опилка и стружка	—	—	40—50	30
		Волокна 20% + + гидроксиды	—	19	15—20	25
Неорганический гидрофобный	Водоподготовка	Осадок от декарбонизации известью Fe<1%	—	—	50—70	40—50
	Сталелитейный завод	Мокрая очистка газов конвертера	—	—	60—70	60
	Угледобыча	Обогащение угля	Полимер: 0,3 кг/т сухого вещества		25—30	35
Маслянистый	Нефтеперерабатывающий завод	Осадок от первой стадии отстаивания	—	15—22	5—10 (с подстилающим слоем)	35—45

* В % на сухое вещество.

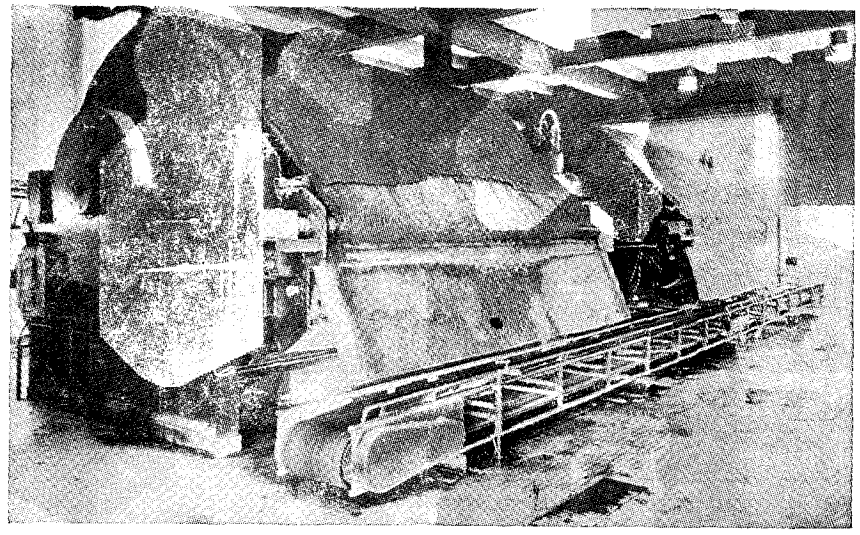


Рис. 17.13. Обезвоживание сброженного осадка на вращающихся вакуум-фильтрах со сходящим полотном и промывкой ткани на станции очистки сточных вод в г. Лилле (Франция) (площадь фильтрующей поверхности одного фильтра 40 м³; производительность 3,5—4,5 т/ч по сухому веществу)

сти, для фильтров можно применять нержавеющую или обрезиненную сталь, титан, свинец, дерево, резину и т. д.

Потребляемая мощность составляет около 1,5 кВт/м² поверхности барабана вакуум-фильтра.

17.1.1.5. Ленточные пресс-фильтры для обезвоживания осадка наиболее целесообразно применять на станциях малой и средней производительности. Это обусловлено несколькими причинами:

непрерывностью процесса и непрерывностью промывки фильтрующего материала;

легкостью обслуживания и прочностью (низкая скорость);

низкими капитальными, энергетическими и амортизационными расходами, а также низкими затратами труда;

получаемый осадок можно брать лопатой.

Описание и эксплуатация. Ленточные пресс-фильтры получили распространение благодаря широкому развитию производства синтетических органических полимеров. Основное условие целесообразности применения этих сооружений для обезвоживания осадка — «суперфлокуляция», достигаемая при использовании полиэлектролитов, которые обеспечивают образование суспензии крупных флокул в чистой иловой воде. Удельное сопротивление осадка $r_{0,5}$ снижается приблизительно до 10^{10} м/кг. После этого флокулированный осадок, как и следовало ожидать, постепенно высыхает в результате просачивания воды

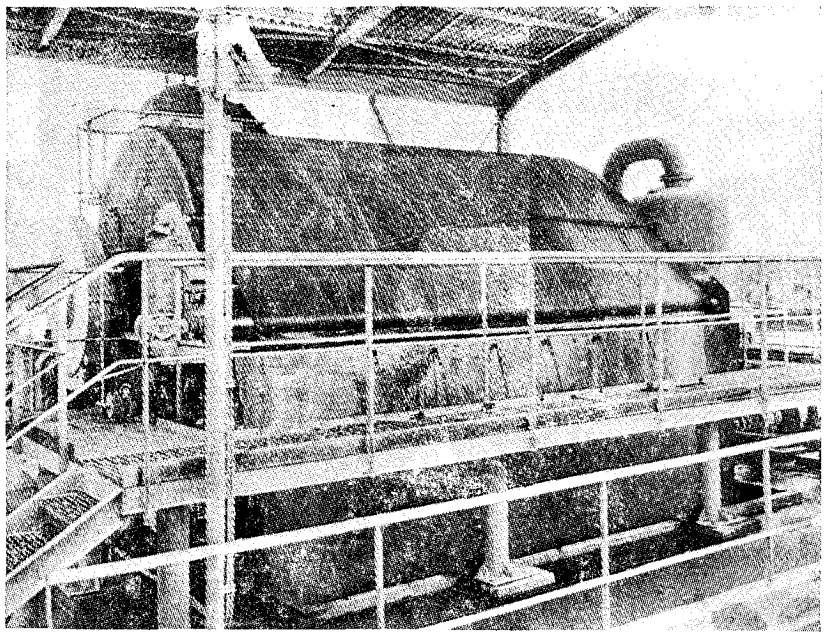


Рис. 17.14. Обезвоживание осадка вакуум-фильтрацией

сквозь фильтрующую ткань со сравнительно большим размером пор (0,2—0,5 мм) или на барабане того же фильтра. Такое естественное дренирование менее чем за 1 мин обеспечивает увеличение концентрации сухого вещества в осадке в 2—4 раза. Получается достаточно плотный кек, выдерживающий постепенно увеличивающееся давление. Применяемое давление ограничено из-за опасности сползания осадка: зона давления не изолирована с боковой стороны и осадок сам обеспечивает изоляцию под действием давления, которое он может выдержать в каждый момент. Максимально допустимое давление остается около 0,1 МПа, поэтому процесс не может обеспечить получение кека с такой же низкой влажностью, какая достигается в фильтр-прессах плиточного типа.

Фаза предварительного дренирования чрезвычайно важна, так как она обеспечивает бо́льшие силы сцепления и лучшую устойчивость осадка для последующего прессования. Правильный выбор реагентов должен обеспечить:

образование хлопка с максимальной способностью отдавать воду;

минимальные расходы реагентов.

Кроме трех явлений, составляющих процесс обезвоживания на ленточных фильтр-прессах — адекватная флокуляция, свободное дренирование, постепенное прессование, — следует упо-

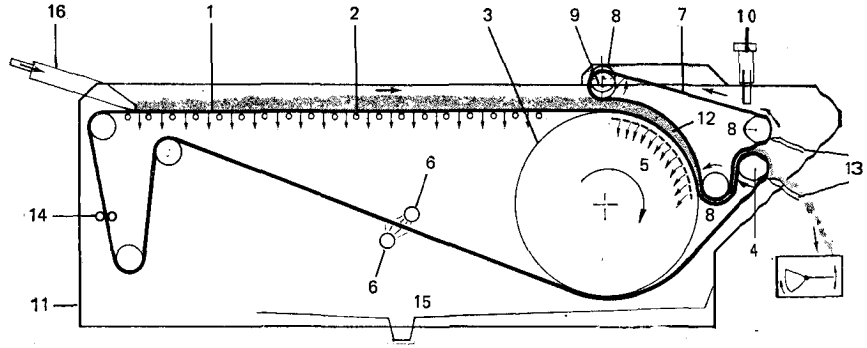


Рис. 17.15. Схема ленточного фильтра Флокпресс (поперечный разрез)

1 — фильтровальная лента; *2* — поддерживающие ролики; *3* — прессовальный барабан; *4* — разгрузочный ролик; *5* — желобки и отверстия; *6* — насадки для промывки; *7* — прессовальная лента; *8* — прессовальные ролики; *9* — ось переменной высоты; *10* — приспособление для регулирования давления; *11* — станина; *12* — прессующий зазор; *13* — скребок; *14* — направляющая ленты фильтра; *15* — отвод фильтрата и промывной воды; *16* — канал для подачи осадка

мянуть и о четвертом, а именно, деформации кека. Она наступает более или менее внезапно и вызывает повышение напряжения сдвига, благодаря чему освобождается интерстициальная вода, а в кеке образуются новые канальцы для оттока воды. Деформация начинается в зоне свободного дренирования, под действием взрыхляющего скребка и выравнивающего ролика и продолжается в зоне прессования за счет попеременного изгибания слоя кека, попадающего между двумя фильтрующими тканями.

Создано много различных типов ленточных фильтр-прессов, в которых осуществлены эти основные принципы фильтрования. Некоторые фильтр-прессы имеют фильтрующую и водонепроницаемую прессовальную ткань. Один из фильтр-прессов — флокпресс показан на рис. 17.15.

Некоторые фильтры оборудованы вакуумной камерой в конце зоны свободного дренирования, но это влечет за собой повышение расхода электроэнергии.

В поисках возможности получения кека с более низкой влажностью пришли к выводу о целесообразности применять двойную фильтрующую ленту с усовершенствованными системами прессования и деформации кека.

На рис. 17.17 показан один из таких фильтров: «Прессдег», в котором вода удаляется с обеих сторон слоя кека. Сжатие для обезвоживания создается главным образом вследствие натяжения фильтрующих тканей; давление, создающееся вдоль цилиндров, обратно пропорционально радиусу роликов.

Основная особенность этого типа ленточных фильтров — чрезвычайная простота эксплуатации: так как все фазы обезвоживания можно непосредственно видеть, оператор имеет воз-

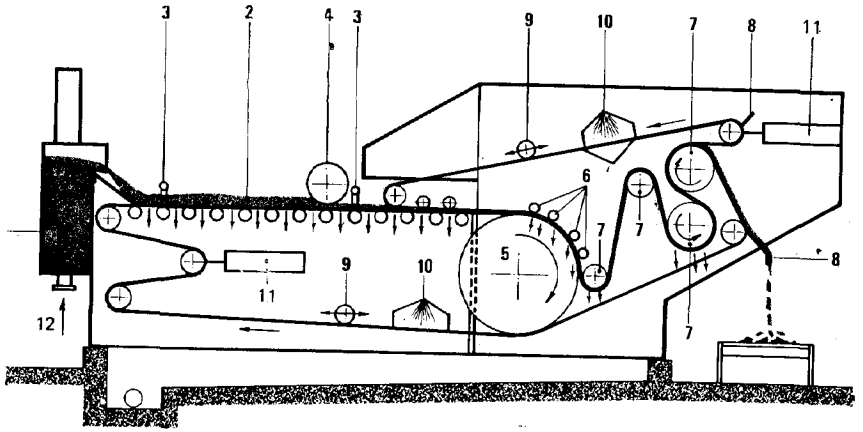


Рис. 17.16. Схема фильтра Прессдег (поперечный разрез)

1 — смеситель (флокулятор); *2* — зона свободного дренирования; *3* — взрыхляющий скребок (подвижный); *4* — выравнивающий ролик (подвижный); *5* — фильтрующий барабан; *6* — дополнительные прессующие ролики, управляемые пневматическими домкратами; *7* — направляющие ролики различного диаметра и приводные ролики; *8* — скребки; *8* — пневматическое устройство для центрирования ткани; *10* — изолированная система промывки; *11* — пневматический домкрат для натяжения ткани; *12* — инжекция полимера

можность быстро исправлять возникающие неполадки и регулировать работу установки строго в соответствии с изменяющимися характеристиками осадка.

Оптимальная эффективность при обезвоживании каждого типа осадка достигается регулированием:

равномерного натяжения ткани с помощью пневматического домкрата;

давления;

линейной скорости движения тканей (обычно от 0,5 до 4 м/мин).

Некоторые фильтры оборудованы дополнительным прессовальным устройством, для них характерно повышенное (но в ограниченных пределах) давление. Влажность кека при этом снижается, но в разной степени в зависимости от типа осадка; капитальная стоимость установки резко возрастает.

Параметры работы фильтр-пресса. Производительность ленточного фильтра выражается в кг сухого вещества, снимаемого с 1 м ширины ленты в течение 1 ч. У самых больших фильтров ширина ленты 3 м.

В табл. 17.3 приведены эксплуатационные данные, изменяющиеся в широких пределах: сравнительно низкая производительность фильтра и высокая влажность кека получены для активного ила из аэротенков с продленной аэрацией или после аэробной стабилизации. Крайне низкие показатели характерны для осадков от обработки стоков пищевой промышленности (маслодельных, консервных заводов и т. д.). Подобным образом

ТАБЛИЦА 17.3

Тип осадка	Характер и источник образования	Концентрация сухого вещества в осадке, %	Производительность по сухому веществу, кг/(м²·ч)	Содержание сухого вещества, %	Расход полимера безводного, кг/т сухого вещества
Органический гидрофильный	Бытовая сточная вода				
	Свежий осадок из первичных отстойников	5—10	250—400	27—35	0,9—2
	Сброженный осадок из первичных отстойников	4—9	250—500	27—36	1—3
	Смесь свежих осадков (75% беззольного вещества)	3,5—8	130—300	21—28	1,5—5
	Сброженная смесь	3—7	120—350	20—28	2—5
	Продленная аэрация или аэробная стабилизация	1,5—3,5	80—150	15—25	2—5
	Физико-химическая очистка ($FeCl_3$ 150 мг/л, известь 200 мг/л)	4—8	200—300	20—27	2—4
	Производственные стоки (Молочные заводы — продленная аэрация)	2—3,5	50—90	11—16	3—5
Неорганический гидрофобный	Осадок от декарбонизации				
	1. $\frac{Fe}{\text{сухое вещество}} \leqslant 1\%$				
	$\frac{Mg}{\text{сухое вещество}} \leqslant 2\%$	15—30	500—1000	55—70	0,2—0,5
	2. $1\% < \frac{Fe}{\text{сухое вещество}} < 5\%$	10—20	300—700	45—65	0,5—1
Волокнистый	Сжигание остатков — очистка дымовых газов	15—25	800—1000	40—50	0,3—0,5
	Производство чугуна и стали — мокрая очистка газов	15—25	400—700	38—55	0,5—1
	Полухимическое получение пульпы:				
	волокна + опилки	4—7	200—400	25—40	—
	стружки + опилки	8—15	600—1000	35—45	—
	Бумажные фабрики — флокуляция солями	2,5—4	100—350	22—30	1—2
Неорганический гидрофильный	Питьевая вода — флокуляция солями Al и Fe	3—6	80—150	16—23	1,5—3
	Частичное удаление карбонатов	5—8	150—200	25—33	1—2
	Фабрики органических красителей — флокуляция солями железа	7—10	150—250	25—30	2—3

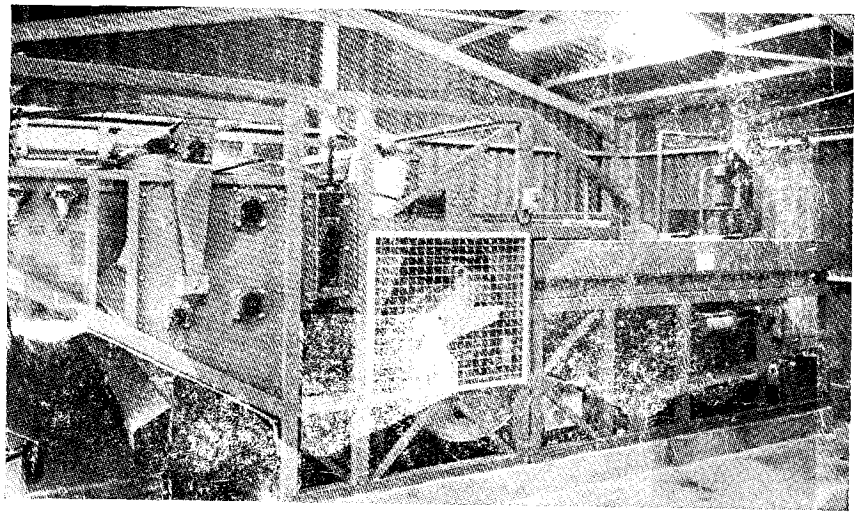


Рис. 17.17. Установка для фильтрации осадка типа 762 Прессдег

ведут себя неорганические осадки с большим содержанием гидроксидов.

С другой стороны, высокая производительность и низкая влажность кека получены для гидрофобных осадков; для некоторых из них, например осадков от декарбонизации, одновременное присутствие гидрофильных гидроксидов (Fe, Al, Mg) привело к ограничению эффективности работы фильтра. Влияние гидроксидов может стать преобладающим при концентрации выше определенного уровня (25—30%).

Ленточные фильтр-прессы нельзя использовать для маслосодержащих осадков, поскольку они способны придавать фильтрующей ткани водонепроницаемость (масло перекрывает открытые поры ткани), а также из-за опасности сползания кека с ленты (при горизонтальном выравнивании слоя), которая не изолирована с боковых сторон. Полимеры применяют очень широко; неорганические реагенты используются редко, за исключением случаев обезвоживания осадков с большим содержанием волокнистых веществ.

Влажность кека, получаемого на ленточных фильтр-прессах, сравнима с влажностью кека с вакуум-фильтров, но потребляемая мощность на 1 т сухого вещества существенно отличается для разного типа оборудования, кВт/т:

ленточный фильтр	5—20
фильтр-пресс	15—40
непрерывный декантатор	30—60
вращающийся вакуум-фильтр	50—150

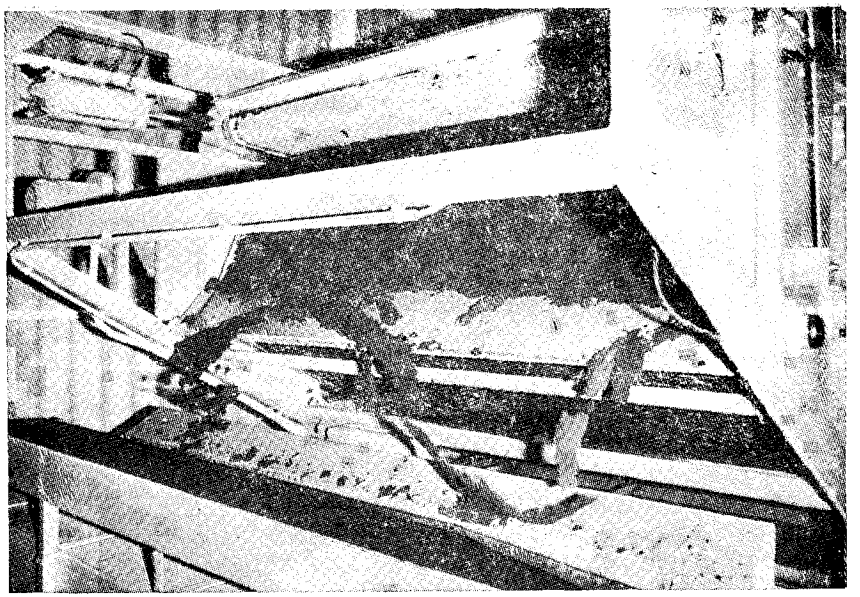


Рис. 17.18. Выгрузка обезвоженного осадка с ленточного фильтр-пресса

17.1.1.6. Фильтрование под давлением. Этот метод несмотря на периодичность процесса и высокие капитальные затраты находит все более широкое применение по следующим причинам:

повышенная автоматизация оборудования требует минимальных затрат труда и надзора за работой фильтра, в частности за удалением кека или промывкой фильтрующей ткани (автоматическая промывка обеспечивается на месте);

достигается снижение влажности кека, что обеспечивает самосгорание осадка при сжигании; снижение расхода топлива в случае тепловой сушки; облегчение вывоза; использование осадка в качестве наполнителя; снижение стоимости транспортировки обезвоженного осадка.

Только на фильтр-прессах применяется очень высокое давление (1,5 МПа и выше), благодаря чему получается кек с максимальным содержанием сухого вещества (обычно более 30%).

Описание и способ действия. Для обезвоживания осадка чаще всего применяют фильтр-прессы, основу которых составляют прессовальные плиты; на таком фильтре процесс выгрузки кека легко механизировать. Фильтр состоит из пакета вертикально расположенных плит с углублением, сильно прижатых друг к другу гидравлическим домкратом с одного конца пакета (рис. 17.19).

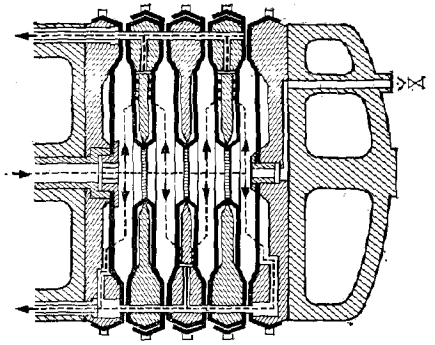


Рис. 17.19. Упрощенная схема фильтр-пресса

Фильтровальную ткань накладывают на плиту с пазами с двух сторон. Осадок, подлежащий обезвоживанию, нагнетается в пространство, образованное двумя смежными плитами. Фильтрат с внутренней стороны ткани попадает в пазы плит и отводится по каналу, проложенному внутри плиты. Такой способ удаления фильтрата гигиеничен и уменьшает вероятность возникновения запаха.

Осадок подается через отверстия в плитах, расположенные в одном сквозном ряду. Они могут быть в центре или в углах плит. Центральное расположение позволяет более равномерно распределить давление по всей плите, что улучшает дренаж.

Каналы для отвода фильтрата от каждой плиты подобным образом связаны в один общий канал или могут быть выведены от каждой плиты в отдельности. При втором варианте качество фильтрата и неполадки в любом отсеке фильтра можно контролировать визуально.

Самые большие фильтр-прессы (до 130 плит) имеют длину одной плиты 1,80—2 м; общая поверхность фильтрации может достигать 800 м^2.

Фильтровальную ткань обычно изготовляют из синтетических волокон. Правильный выбор ее оказывает большое влияние на производительность фильтр-пресса. В некоторых случаях фильтровальную ткань монтируют не непосредственно на плите, а накладывают на более грубую ткань-подложку, чтобы улучшить условия распределения давления по всей фильтрующей поверхности, облегчить отвод фильтрата и обеспечить более эффективную промывку. Комплектный фильтр-пресс работает под очень мощным давлением, прижимающим плиты друг к другу. Давление фильтрации может достигать 2,5 МПа, но при обезвоживании осадка редко имеет смысл повышать его более 1,5 МПа.

Пространство, образованное углублениями двух соседних плит, определяет толщину слоя кека. Она может составлять от 20 до 30 мм в зависимости от удельного сопротивления осадка и времени полного цикла.

Для быстрофильтрующихся осадков (например, осадков, образующихся при удалении карбонатов) толщина слоя кека составляет 40 и даже 50 мм (чтобы увеличить время цикла между двумя раскрытиями фильтра).

Плиты можно изготовлять из различных материалов: чугуна, резины, армированной сталью; стали, покрытой пористой резиной; стекловолокна, усиленного полиэфиром или полипропиленом (более легкие по массе); нержавеющей стали (для очень коррозийных осадков).

Применяют два основных типа оборудования: с плитами, подвешенными к верхней перекладине (рис. 17.20), и с плитами, удерживаемыми горизонтально двумя продольными направляющими (рис. 17.21).

Фильтроцикл. В работе фильтра различают следующие стадии: заполнение, фильтрование, открывание фильтра, очистку.

Заполнение. В течение этой сравнительно короткой стадии (3—10% времени полного цикла) фильтрационная камера, ограниченная внешней поверхностью фильтровальных тканей двух прилегающих плит, заполняется осадком, подлежащим обезвоживанию. Время заполнения зависит от производительности насоса, подающего осадок.

Фильтрование. Как только камера заполняется, дальнейшее поступление обезвоживаемого осадка вызывает повышение давления внутри камер вследствие сжатия пор осадка при его уплотнении.

Открывание фильтра. На этой стадии плиты отходят друг от друга, и кек, образовавшийся между двумя плитами, удаляется.

Очистка проводится только время от времени; она состоит в промывке и чистке ткани щетками с целью возвращения ей первоначальной фильтрующей способности.

Полная автоматизация процесса фильтрования предполагает механизацию передвижения плит и влечет за собой снижение реального времени простоя, в том числе на очистку фильтровальной ткани. Это время значительно снижено с введением метода промывки с использованием воды под высоким давлением (8—10 МПа) синхронно передвижению плит.

На очистку ткани фильтр-пресса с 130 плитами общей площадью 500 м^2 затрачивается от 2 до 4 ч рабочего времени одного оператора; ткань чистят через каждые 20—50 циклов в случае хорошо подготовленного осадка бытовых сточных вод. Окончание стадии фильтрования можно определить по таймеру или по датчику расхода (обычно для больших фильтров), устанавливающему окончание фильтрования при расходе порядка 10—20 л/м^{2}ч.

Производительность фильтр-прессов по сухому веществу обычно составляет от 2 до 10 кг/(м^2·ч). Их можно применять для осадков с высоким значением $r_{0,5}$ (до $8 \cdot 10^{12}$ м/кг). Время прессования может быть от 1 до 6 ч, но часто ограничено 1—3 ч. Рабочее давление изменяется от 0,6 до 1,5 МПа. Одно из преимуществ фильтр-прессов перед вакуум-фильтрами заключает-

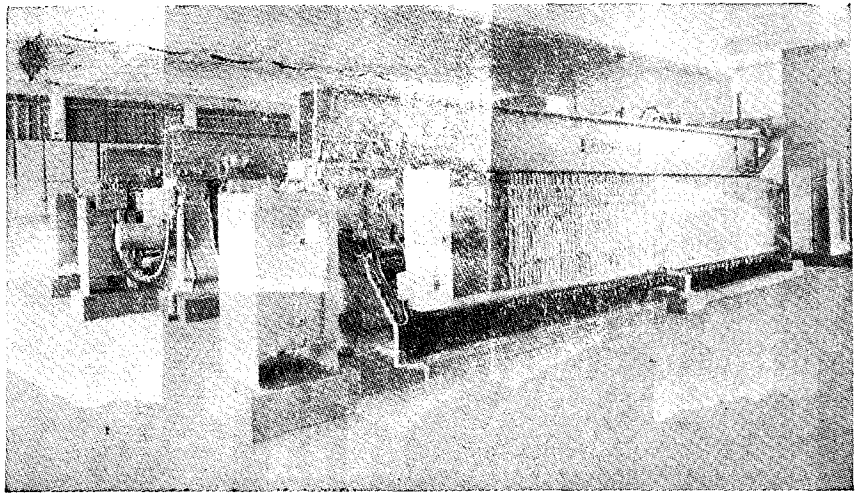


Рис. 17.20. Общий вид установки из трех фильтр-прессов на станции очистки сточных вод в Каннах, Франция (общая фильтрующая поверхность 660 м²)

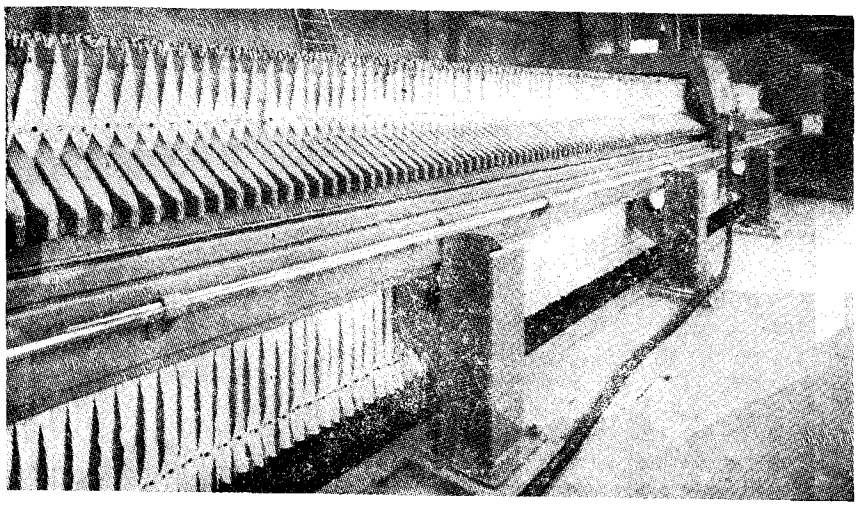


Рис. 17.21. Часть фильтр-пресса на станции Шелл—Шеми в Форсюрмер, Франция

ся в возможности обезвоживать осадки с более высоким удельным сопротивлением, что позволяет:

снизить расход реагентов для кондиционирования (в зависимости от степени забивания фильтрующей ткани);

использовать менее эффективные, но также и менее дорогостоящие реагенты (например, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$);

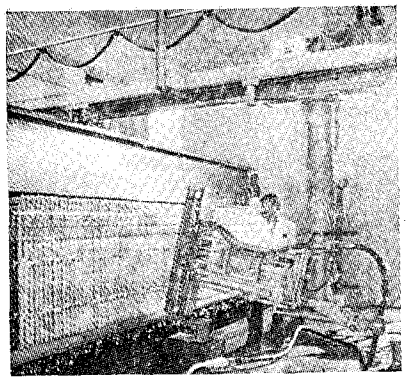


Рис. 17.22. Фильтр-пресс. Механическая и полуавтоматическая промывка ткани

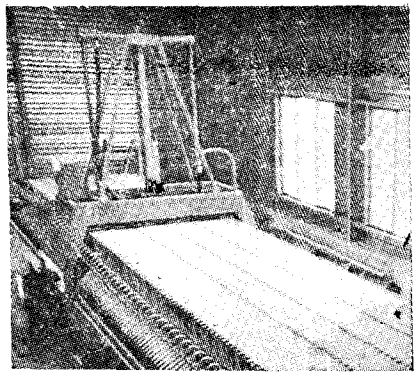


Рис. 17.23. Фильтр-пресс. Автоматическая промывка ткани

обезвоживать осадок без предварительного кондиционирования, если его удельное сопротивление находится в пределах $5 \cdot 10^{11}$—$8 \cdot 10^{12}$ м/кг, т. е. в пределах, когда вакуум-фильтры не могут быть применены для сырого осадка. На основе законов фильтрования через поверхность, с учетом величин удельного сопротивления $r_{0,5}$ (т. е. при давлении $P = 0{,}05$ МПа) и сжимаемости S (величина, которую можно определить в лабораторных условиях с помощью стальной ячейки с поршнем), была дана формула для расчета времени прессования:

$$t_f = k \frac{\eta r_{0,5} 2^s e^2 C}{P^{1-s}} \left(\frac{S_f d_g}{C} - 1 \right)^2,$$

где t_f — время прессования; η — вязкость фильтрата; $r_{0,5}$ — удельное сопротивление кондиционированного осадка при давлении $P = 0{,}05$ МПа; s — коэффициент сжимаемости кондиционированного осадка; e — толщина слоя кека; C — концентрация кондиционированного осадка по сухому веществу; P — давление прессования; S_f — содержание сухого вещества в кеке, %; d_g — объем массы полученного кека; k — поправочный коэффициент, учитывающий забивание ткани ($k = 1{,}2$—$1{,}3$, если фильтр оборудован устройством для автоматической промывки ткани).

Производительность пресс-фильтра рассчитывают по формуле

$$L = e d_g S_f f / 2 t_{cy} 100,$$

где t_{cy} — время полного цикла;

$$t_{cy} = t_f + t_d + t_r,$$

где t_d — время открывания фильтр-пресса, сбрасывания кека и закрывания; t_r — время заполнения.

Значение t_d зависит от производительности насоса, подающего осадок, и обычно составляет 5—15 мин. В механизированных фильтрах $t_d = 10$—20 мин, т. е. вполне достаточно для полного

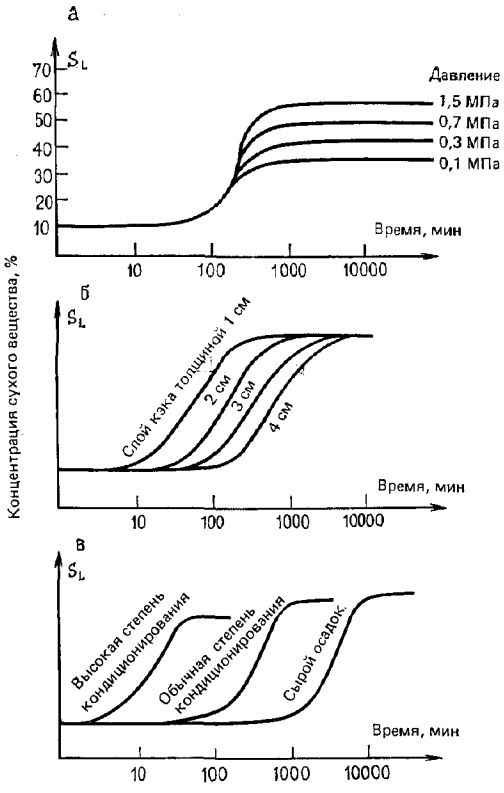


Рис. 17.24. Влияние давления *(а)*, толщины кека *(б)* и степени кондиционирования на время обезвоживания в процессе фильтрации под давлением

удаления кека. Необходимо отметить, что время прессования t_f пропорционально площади камеры уплотнения и обратно пропорционально концентрации кондиционированного осадка. Оно зависит также от удельного сопротивления и коэффициента сжимаемости осадка.

Однако работа фильтр-прессов менее зависит от качества кондиционирования осадка, а следовательно, они более надежны в эксплуатации, чем вакуум-фильтры. Важно уделять внимание подготовке осадка, чтобы добиться максимального уплотнения и снижения удельного сопротивления и сжимаемости осадка. Органические осадки с высоким содержанием белков даже после кондиционирования имеют коэффициент сжимаемости от 0,8 до 1,5.

Увеличивая давление прессования, можно достичь сравнительно небольшого выигрыша во времени прессования, но чем больше давление, тем меньше влажность кека. Кривые *1*, *2* и *3* на рис. 17.24 отражают зависимость конечной концентрации кека по сухому веществу и времени фильтрации от давления, толщины кека и способа кондиционирования.

Характеристика работы фильтр-прессов. В табл. 17.4 приведены результаты, которые можно ожидать при обработке основных типов осадков на фильтр-прессах.

Как видно из данных табл. 17.4, фильтр-прессы применимы почти для всех типов осадков. Можно сделать следующие пояснения и рекомендации относительно использования осадков.

Гидрофильный органический осадок. Тепловое кондиционирование, которое применяют в сущности только для свежих или сброженных осадков крупных станций по очистке бытовых сточных вод, позволяет получить осадок, легко обезво-

ТАБЛИЦА 17.4

Осадок	Характер осадка и источник образования	Кондиционирование*		Производительность по сухому веществу, кг/(м²·ч)	Содержание сухого вещества в кеке, %
		$FeCl_3$, %	CaO, %		
Органический гидрофильный с зольностью от 70 до 10%	Смесь свежих осадков бытовых сточных вод	3—7	11—19	2—4	40—50
	Сброженная смесь осадков бытовых сточных вод	4—7	11—22,5	2—4	35—50
		Тепловая обработка		2,5—5	45—60
	Осадок бытовых сточных вод, продленная аэрация	6—10	15—30	1,5—3	33—38
	Осадок бытовых сточных вод, физико-химическая очистка ($FeCl_3$+ + известь)	—	15—22,5	1,5—2,5	33—45
	Пивоваренный завод, осадок биологической очистки	5—7	22,5 (10% осадка от удаления карбонатов)	2,5—3	35—38
	Синтез аминокислот, осадок биологической очистки	7—12	30	1,5—2	30—35
Неорганический гидрофильный гидроксиды Al, Fe, Cr и т. д.	Частичная декарбонизация Fe/сухое вещество ⩽ 10%		7,5—11	5	50—55
	6% ⩽ Fe/сухое вещество ⩽ 10%			6	55—60
	Осветление поверхностных вод, соли алюминия (небольшой осадок)		19—30	1,5—3	30—40
	Травление алюминия (HCl)		—	5—6	35—40
	Нейтрализация известью		15	5	40
	Анодирование алюминия, нейтрализация каустической содой		—	1,5	30
	Травление стали, нейтрализация известью		—	3,5	45—50
	Электропокрытие, гальванизация		—	2	30—35
	Удаление хроматов		19	2	30
Неорганический гидрофильный	Удаление карбонатов Fe/сухое вещество ⩽ 2%		—	10—20	60—70
	2% ⩽ Fe/сухое вещество ⩽ 5%		—	8—13	50—60
	Сжигание мусора, очистка дымовых газов		—	10—15	55—60
	Газоочистка		—	7—15	60—70

Продолжение табл. 17.4

Осадок	Характер осадка и источник образования	Кондиционирование*		Производительность по сухому веществу, кг/(м²·ч)	Содержание сухого вещества в кеке, %
		$FeCl_3$, %	CaO, %		
Маслянистые	Масла, используемые при обработке металла или сброс растворенных масел:				
	разрушение кислотой + нейтрализация флотация (соли Al + известь)		11	3	50—60
	нефтепродуктов (30% от сухого вещества)		2,5	4	50—55
Неорганические маслянистые	Сток от прокатных станов, большое содержание масел и жиров		—	15—20	85

* В % к массе сухого вещества.

живающийся за счет освобождения связанной воды гидрофильной фракции. Кондиционирование неорганическими реагентами рекомендуется осуществлять, чтобы избежать трудностей, с которыми часто сталкиваются при кондиционировании полиэлектролитами (опасность прилипания кека, который обычно более пористый, губчатый, ноздреватый и потерей времени в связи с частой промывкой ткани).

Неорганический гидрофильный осадок. На фильтр-прессе получается осадок с низкой влажностью и обычно требуется добавка извести, которая оказывает очень благоприятное воздействие на гидрофильные структуры (особенно структуру гидроксидов металлов).

Неорганический гидрофобный осадок. Этот осадок с высокой плотностью легко обезвоживается благодаря небольшой сжимаемости и наличию кристаллических частиц. Зернистая структура осадка, состоящего из мельчайших частиц, является решающим фактором, обусловливающим способность осадка обезвоживаться. К тому же обезвоживание происходит без добавки каких-либо реагентов.

Маслосодержащие осадки. Масло в осадке находится в виде эмульсии или адсорбировано на его частицах. Фильтр-прессы благодаря высокому рабочему давлению могут быть использованы для осадков, содержащих легкие масла. Присутствие животных и растительных жиров может иногда ухудшить работу фильтр-пресса, ткань которого довольно часто нужно обезжиривать.

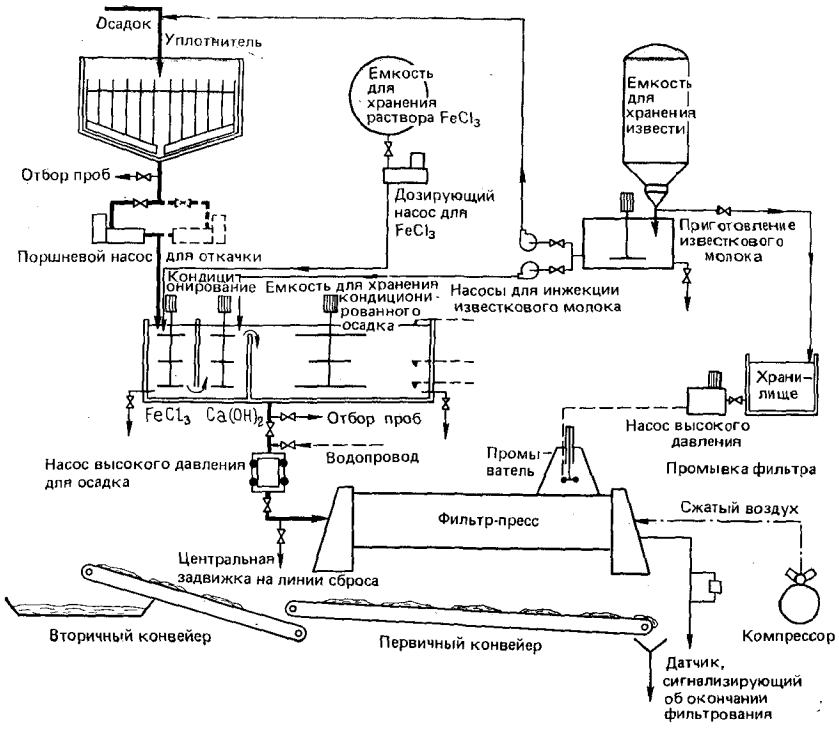


Рис. 17.25. Теоретическая схема процесса фильтрации под давлением. Органический гидрофильный осадок

Эксплуатация фильтр-прессов. Серьезное внимание следует уделить способу загрузки фильтр-пресса. Для этой цели можно использовать следующее оборудование:

диафрагменные насосы с автоматическим регулированием расхода;

объемные насосы с воздушным амортизатором (эксцентриковый винтовой или поршневой насосы), которые устанавливают на отводном трубопроводе, связанном с буферной емкостью;

двойной комплект емкостей под атмосферным давлением с попеременным заполнением и опорожнением.

В сущности, невозможно регулировать химическое (или тепловое) кондиционирование в замкнутой системе по расходу осадка, поступающего на фильтр-пресс, так как он существенно изменяется. Кондиционирование осадка достигается в емкостях, установленных перед фильтрами (рис. 17.25).

Работоспособность тканей различна, но, как правило, она должна выдерживать не менее 500 фильтроциклов.

17.1.1.7. Автоматизированная тонкослойная фильтрация под давлением. Для обслуживания механизированного фильтр-пресса плиточного типа требуется присутствие оператора, который управляет выгрузкой кека в течение 20—30 мин через каждые 1—3 ч фильтроцикла. Новый тип фильтр-пресса полностью автоматизирован. Основная его особенность — возможность образования тонкого слоя кека (толщиной 3—10 мм), который не мог бы быть выгружен в фильтрах обычного типа без применения ручного труда. Прессование осуществляется в течение нескольких минут, и в таком случае необходимо только быстрее открыть фильтр и снять слой кека при одновременной его выгрузке. Производительность этого фильтра в 5—10 раз выше, чем у фильтр-пресса плиточного типа.

В автоматизированных фильтрах давление фильтрации передается мембране, сжимающей несколько плит, расположенных рядом, или на одиночную плиту, которой сообщается циклическое движение, синхронное с продвижением фильтровальной ленты. Давление может также создаваться гидравлическим сжатием нескольких вертикальных плит с одной жесткой и одной фильтрующей поверхностью.

17.1.1.8. Непрерывное прессование

Непрерывно действующий пресс винтового типа. На этом фильтре получается кек с высоким содержанием сухого вещества (35—45%) при обработке частично обезвоженных на вакуум-фильтрах или центрифугах осадков.

Пресс состоит из винта (одиночного или двойного), вращающегося с малой скоростью (несколько оборотов в минуту), который сжимает осадок в перфорированном цилиндре. Ограничение проскока осадка достигается увеличением размера винта или смыканием конуса.

Из-за особенностей этого оборудования (перфорированная поверхность с большими отверстиями и высокое рабочее давление) на нем могут эффективно обрабатываться только грубые, длинно-волокнистые осадки. Однако одно из основных применений эти фильтры нашли для осадков бумажных фабрик, предварительно уплотненных до концентрации 15—20%, и содержащих волокна, опилки, древесную стружку, кору и т. д. Осложнения в эксплуатации чаще всего возникают в связи с очисткой перфорированных цилиндров при обезвоживании некоторых видов осадков.

Непрерывно действующий пресс дискового типа. Те же самые замечания, приведенные применительно к винтовым прессам, относятся и к дисковым прессам. Области их использования также идентичны. Фильтр состоит из двух круглых дисков большого диаметра, перфорированных с внутренней стороны и очень медленно вращающихся. Оба диска наклонены к оси так, что образуется «клин» сжатия, в котором и происходит обезвоживание.

17.1.2.1. Центрифугируемость. Центрифугирование. В цилиндрическом сосуде, вращающемся с угловой скоростью ω (рад/с) или N (об/мин) и содержащем кольцо жидкости радиусом R (м), центробежное ускорение (м/с^2), действующее на частицы, определяется выражением

$$a = \omega^2 R = 0{,}011 N^2 R.$$

Центробежная сила, развиваемая промышленными центрифугами, может более чем в 1000 раз превышать силу земного тяготения, под действием которой протекают процессы осаждения. Ускорение, развиваемое центрифугами, принято выражать по отношению к ускорению свободного падения g ($g = 9{,}81$ м/с^2).

Сила, действующая на частицу единичной массы, выражается:

$$F_c = 0{,}011 N^2 R (d_s - d_L) \frac{1}{g},$$

где d_s — удельная масса частицы; d_L — удельная масса интерстициальной жидкости.

$$f = F_c' \sin\alpha\,(d_s - d_L) = F' \sin\alpha, \text{ где } F_c' = 11{,}2 \times 10^{-4} R N^2.$$

$$f' = F_c'' \sin\alpha\, d_s = F'' \sin\alpha, \text{ где } F_c'' = 11{,}2 \times 10^{-4} r N^2.$$

Силы, действующие таким образом на мельчайшие частицы иловой суспензии, создают центробежное ускорение от 1000 до 3000 g и скорость осаждения около 10 м/ч, что примерно в 50 раз превышает скорость естественного уплотнения осадка. Кроме того, при концентрированных суспензиях они разрывают силы связи и разделяют частицы, что невозможно достичь обычным статическим отстаиванием.

Когда проба осадка, содержащего значительную долю коллоидных веществ, подвергается обработке в центробежном поле

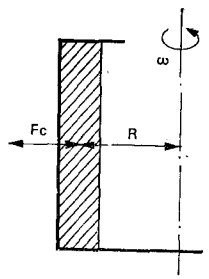


Рис. 17.26

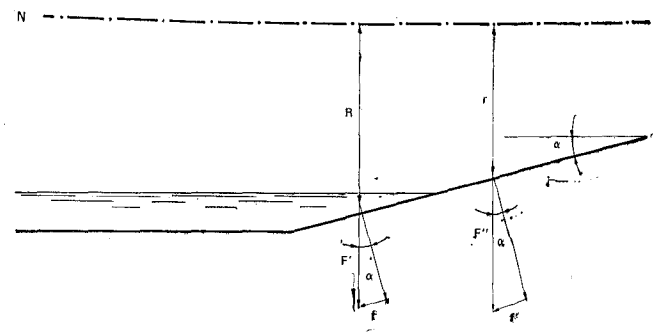


Рис. 17.27. Влияние конусности ротора и скорости вращения на скорость отлива

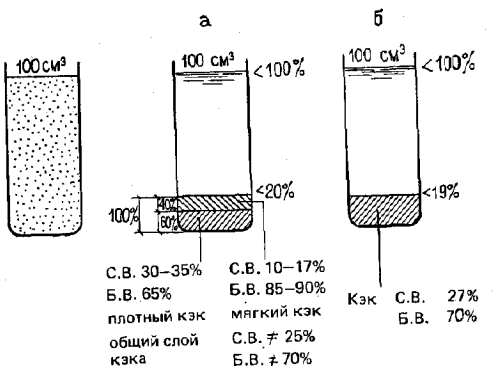


Рис. 17.28. Схема центрифугирования осадка городских сточных вод (сухое вещество С. В., беззольное вещество Б. В.):
а — без флокуляции (фугат С. В. 0,05—0,1%); *б* — с флокуляцией (фугат С. В. близко к нулю)

(к примеру 1000 *g* в течение 1—2 мин) в лабораторной центрифуге, в опытной пробирке наблюдается (см. рис. 17.28) очень мутная иловая вода, содержащая 0,1—1 г/л сухого вещества, а на дне — слой осадка, который можно подразделить на две зоны: нижнюю, состоящую из плотного вещества с высокой концентрацией (содержание сухого вещества 30—35%, его зольность 35%) и верхнюю с малой плотностью и более низкой концентрацией (содержание сухого вещества 10—17%, его зольность 10—15%).

Если повторить эксперимент с кондиционированным осадком, обработанным органическим полиэлектролитом, в пробирке (рис. 17.28) образуется прозрачная иловая жидкость, содержащая очень мало сухого вещества, а на дне ее — полностью однородный слой осадка менее концентрированный, чем нижний слой, но концентрация его больше средней концентрации двух слоев в пробирке с некондиционированным осадком.

Эта способность иловой суспензии разделяться в лабораторных центрифугах на две обособленные фазы (первую — очень чистую, с содержанием сухого вещества около 0,1 г/л и вторую — достаточно однородную фазу) называется способностью осадка к центрифугированию или центрифугируемостью. Цель кондиционирования — улучшить этот параметр. При определенных ускорении (около 1000 *g*) и времени центрифугирования (несколько минут) центрифугируемость обратно пропорциональна содержанию сухого вещества в иловой воде. Другим важным параметром является плотность кека, которую можно измерить пенетрометром.

17.1.2.2. Осадительные центрифуги непрерывного действия — аппараты, наиболее часто применяемые для обезвоживания осадков сточных вод. Как загрузка, так и выгрузка фугата и кека в этих центрифугах осуществляются непрерывно. Основные элементы центрифуги — горизонтальный вращающийся цилиндро-конический блок и расположенный внутри него шнек, вращающийся с несколько отличающейся скоростью. Некоторые центрифуги оборудованы двойным внутренним шнеком для более равномерного ускорения движения осадка.

Выбор этих центрифуг для обезвоживания осадков сточных вод обусловлен не только их непрерывным действием, но и следующими причинами:

- фазы разделяются декантацией жидкости в центробежном поле с последующей шнековой транспортировкой осадка, который также проходит через зону дополнительного обезвоживания, не соприкасаясь с жидкостью. При этом не возникает опасности засорения, так как жидкая фаза не проходит через фильтрующую среду, как в случае центрифужных сушилок;
- в отличие от сепараторов дискового типа (с. 522), имеющих узкие выгрузочные отверстия и каналы внутри корпуса в непрерывнодействующих центрифугах (с декантацией), выгрузочные окна не засоряются при условии соответствующего размера частиц осадка;
- после кондиционирования полиэлектролитами достигается высокая степень разделения и гомогенность кека.

Последние достижения в технике центрифугирования сделали возможным промышленное применение этих центрифуг для обезвоживания различных типов осадков, в том числе и гидрофильных коллоидных осадков, с которыми чаще всего сталкиваются при обработке сточных вод. К числу этих достижений относятся: более современная геометрия оборудования; более глубокие знания эксплуатационных параметров (скорости, высоты кольца жидкости и т. д.); пониженная опасность засорения; улучшенное антиабразивное покрытие внутренних поверхностей; возросшая специфичность синтетических полимеров.

Конструктивные параметры. Непрерывнодействующие осадительные центрифуги подразделяются прежде всего в соответствии с направлением движения иловой суспензии и кека на прямоточные и противоточные (рис. 17.29 и 17.30).

Подачу осадка обычно осуществляют в центре; от тангенциальной подачи отказались из-за осложнений в эксплуатации (частые засоры вследствие неоднородности осадка), хотя она и более желательна, так как обеспечивает постепенное ускорение флокулированного осадка.

Противоточные центрифуги пригодны для плотных осадков, тогда как прямоточные лучше подходят для обезвоживания коллоидных гидрофильных осадков, вследствие их более низкой внутренней турбулентности.

Конструктивные параметры непрерывнодействующих центрифуг перечислены в подписях к рис. 17.31.

Ротор центрифуги должен быть выполнен в виде цилиндра, переходящего в конус. Сепарация в основном происходит в цилиндрической части, а коническая секция служит для транспортирования кека к месту выгрузки. В месте перехода цилиндра в конус кек подвергается противодавлению, которое становится слабее с уменьшением конусности ротора. Это давление не должно разрушать силы сцепления в уплотненном осадке,

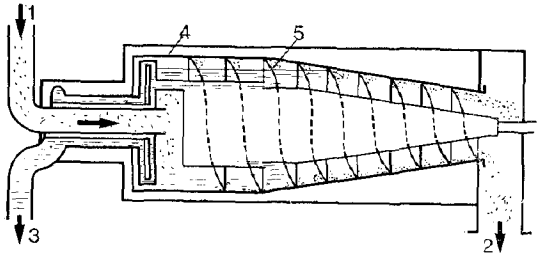


Рис. 17.29. Прямоточная непрерывнодействующая центрифуга с подачей осадка в центре

1 — подача осадка; *2* — выгрузка кека; *3* — отвод фугата; *4* — ротор; *5* — винтовой скребок

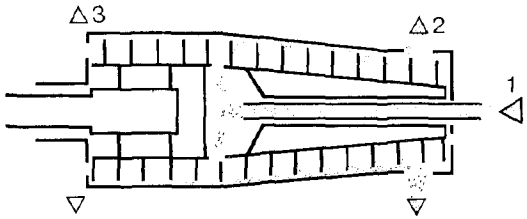


Рис. 17.30. Противоточная непрерывнодействующая центрифуга с подачей осадка в центре (см. поз. на рис. 17.30)

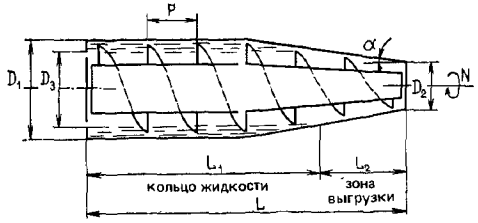


Рис. 17.31. Конструктивные параметры центрифуги

геометрия ротора: отношение L/D_1, угол конуса α; скорость вращения ротора $V_a(N)$ или ускорение F_c; относительная скорость вращения шнека V_r; шаг винта P; глубина кольца жидкости 0,5 (D_1—D_3)

в противном случае масса выгружаемого кека уменьшается и вновь образуется значительное количество суспензии (см. рис. 17.29).

Противодавление можно уменьшить снижением скорости вращения ротора, однако это снижение не должно быть слишком большим, иначе кек окажется недостаточно сухим.

Сейчас, когда все чаще приходится иметь дело с гидрофильными коллоидными осадками, необходимо усовершенствовать конструкцию выгрузочного устройства центрифуг, так как у этих осадков кек даже после флокуляции менее плотный.

Основные характеристики этих центрифуг:

отношение L/D от 2,5 до 3,5;

угол конуса α=6—8°. Для труднообрабатываемых осадков (например, активного ила из аэротенков с продленной аэрацией) α можно уменьшить до 4°;

устройство для изменения глубины кольца жидкости, сначала в противоточных, затем в прямоточных аппаратах. Уменьшение зоны выхода облегчает извлечение кека, хотя его влажность увеличивается.

Возможность быстро изменить глубину кольца жидкости является важным показателем маневренности центрифуг при обработке осадков непостоянной плотности;

при обработке осадков сточных вод предпочтительней применять шнек с однозаходной резьбой. Значение P обычно лежит в пределах 0,15—0,22 D_1;

развиваемая центробежная сила составляет от 500 до 2500 g; все более широкое применение находят двигатели с переменной скоростью, что позволяет быстро привести условия работы центрифуги в соответствие с количеством обрабатываемой иловой суспензии;

относительную скорость вращения шнека V_R можно изменять от 3 до 30 об/мин в зависимости от потребности (влажности кека, расхода). Этот параметр определяет продолжительность уплотнения кека в центрифуге.

Эксплуатационные параметры. К ним относятся: расход обезвоживаемого осадка; содержание сухого вещества в исходной суспензии; характер интерстициальной жидкости (плотность, вязкость в зависимости от температуры); свойства осадка и, в частности, способ его кондиционирования. Влияние этих параметров приближенно оценено в табл. 17.

Качество кондиционирования наиболее важно. Для многих типов осадков, и особенно городских сточных вод, оно является определяющим фактором достижения высокой эффективности задержания сухого вещества (95% и более).

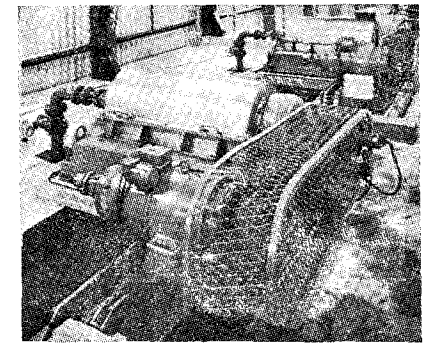


Рис. 17.32. Центрифуга диаметром 43 см. Обезвоживание осадка в Бьяритц, Франция

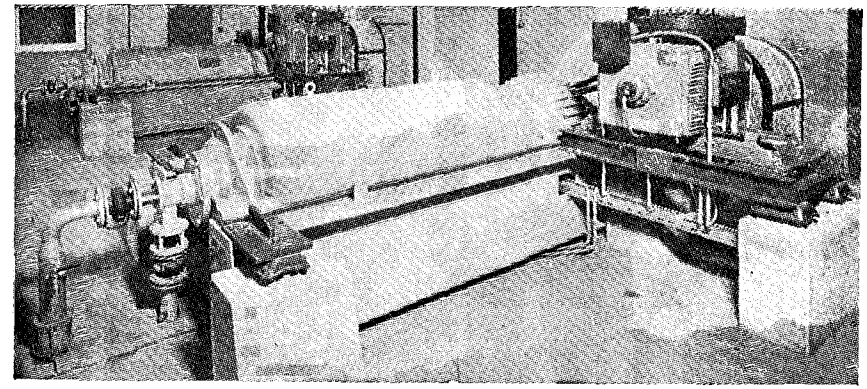


Рис. 17.33. Центрифуга диаметром 63 см. Станция обработки сточных вод (г. Вевей-Монтро, Швейцария)

ТАБЛИЦА 17.5

	Производительность по сухому веществу	Эффективность задержания сухого вещества	Влажность кека
Расход осадка	+	—	+
Содержание сухого вещества	+	+	+
Кондиционирование	+	+	—или=

Оптимальным кондиционированием обезвоживаемого осадка должно достигаться образование объемистого тяжелого хлопка, а не зернистого, который желательно получать для фильтрования. Для этой цели лучшими реагентами являются полиэлектролиты.

Высокая концентрация исходного осадка по сухому веществу — благоприятный фактор, но она не должна превышать определенного предела, выше которого осадок с трудом передвигается шнеком. Этот предел, по-видимому, будет составлять около 8—10% сухого вещества в исходном осадке. Чрезмерно высокая концентрация сухого вещества в осадках городских сточных вод может препятствовать диффузии флокулянта из-за слишком высокой вязкости.

Так же, как и при использовании ленточных фильтров, очень важно найти оптимальную дозу полиэлектролита. Лабораторных исследований поведения осадка (оценка размера флокул, измерение сопротивления сдвигу и пенетрометрия) обычно оказывается недостаточно и следует проводить испытания в производственных условиях.

Характеристика. В табл. 17.5 даны ожидаемые значения содержания сухого вещества в кеке при обработке различных типов осадков на непрерывнодействующих осадительных центрифугах.

Расход полимера и показатели работы центрифуги, приведенные в табл. 17.5, соответствуют эффективности задержания сухого вещества, превышающей 95%. Более высокие значения содержания сухого вещества в кеке можно легко получить, ограничившись задержанием самых тяжелых веществ (см. рис. 17.28). Однако это влечет за собой снижение эффективности задержания сухого вещества и увеличение его содержания в фугате, что усложняет рециркуляцию последнего.

Эффективность задержания сухого вещества выражается в виде:

$$P = 1 - \frac{C_F (C_s - C)}{C (C_s - C_F)},$$

где C — концентрация исходного осадка по сухому веществу; C_s — концентрация кека по сухому веществу; C_F — концентрация фугата по сухому веществу.

Установленная производительность относится к центрифугам с диаметром ротора от 40 до 45 см.

ТАБЛИЦА 17.5

Тип осадка	Характер и происхождение осадка	Расход полиэлектролита безводного на 1 т сухого вещества осадков, кг	Производительность сухого вещества в час, кг	Содержание сухого вещества в кеке, %
Органический гидрофильный	Смесь свежих осадков сточных вод, зольность ⩾25%	2—5	300—500	19—26
	Сброженная смесь[1] осадков сточных вод, зольность ⩾40%	2,5—5,5	250—500	17—26
	Осадок от продленной аэрации или аэробной стабилизации	3—6	200—300	14—22
	Осадок от биологической очистки стоков маслозавода, зольность <20%	3,5—6	190—200	9—16
	Обработка картофеля — свежий осадок, обработанный известью	5—7	300—350	20—25
Маслянистые гидрофильные	Нефтезавод — флотация с полимером — содержание масел 30%[2]	1—2	350—600	30—40
	Обработка растворенных масел — разрушение кислотой и физико-химическая обработка	0,5—1	400—700	40—60
Волокнистые	Белый поток от целлюлозно-бумажных предприятий — флокуляция солями железа + известью	1—2	200—300	20—30
Неорганические гидрофильные	Осветление воды поверхностных источников (соли Al + алеврит)	1—2	300—400	22—27
	Производство органических красителей (соли железа + известь)	2—4	300—450	19—25
	Кожзаводы (флокуляция — соли Al)	1—2	200—300	18—22
	Винокуренный завод, предварительная физико-химическая обработка P >90%	—	300—400	22—26

[1] Смесь: осадок из первичных отстойников + избыточный активный ил.
[2] % отнесен к массе сухого вещества.



Рис. 17.34. Схема работы промышленной установки по обезвоживанию осадка на центрифугах

1 — циклон для выделения песка; *2* — решетка; *3* — уплотнитель; *4* — центрифуга

Центрифугирование особенно целесообразно применять для тяжелых осадков, которые прекрасно обезвоживаются. При этом сухое вещество задерживается почти полностью. Однако конечная влажность кека никогда не бывает очень низкой. Оборудование компактно и гигиенично; процесс центрифугирования происходит в изолированном аппарате. Эксплуатация центрифуг не требует ни непосредственного надзора, ни постоянной рабочей единицы. Основной недостаток их — неизбежный износ шнека, если в осадке присутствуют абразивные вещества. Однако достигнуты значительные успехи в разработке защитных покрытий элементов, подверженных эрозии (в частности, использование карбида вольфрама или керамических материалов); продолжительность работы шнека может превысить 4000 ч, прежде чем возникнет необходимость замены изношенных частей.

Несмотря на это, непрерывнодействующие осадительные центрифуги не рекомендуется применять для гранулированных и абразивных осадков, основу которых составляют оксиды (т. е. гидрофобные неорганические осадки) от производства чугуна и стали. Кроме того, всегда желательно удалять из осадков песок с помощью циклонов.

Непрерывнодействующие осадительные центрифуги пригодны для обработки маслосодержащих осадков, хотя невозможно избежать попадания некоторого количества масел в фугат.

Применение центрифуг. Основная схема установки представлена на рис. 17.34. Существует несколько типов центрифуг,

диаметр ротора самых распространенных центрифуг может достигать 300 мм. На станциях обработки бытовых или производственных сточных вод, на которых образуются гетерогенные осадки, при использовании небольших центрифуг (с диаметром ротора 25—45 см) должны быть приняты следующие меры предосторожности: процеживание осадка через решетки и полное удаление из него песка; решетки и циклоны должны предшествовать уплотнителям, которые включаются в схему, если осадок недостаточно плотный. Процеживание осадка можно исключить, если в схеме обработки стоков предусмотрено дополнительное процеживание сырой сточной воды через решетки с прозорами 8—10 мм.

Осадок подается на центрифуги поршневыми насосами различной производительности. Флокуляция проводится в трубопроводе, т. е. непосредственным введением разбавленного раствора полиэлектролита в иловой трубопровод непосредственно перед центрифугой.

Установка может быть полностью автоматизирована; система автоматизации включает предохранительное устройство, чувствительное к чрезмерному трению между ротором и шнеком, устройства для автоматической промывки, регулирования насоса — дозатора реагентов по производительности насоса, перекачивающего осадок, регулирование насоса — дозатора по концентрации поступающего осадка.

Фугат обычно подают в начало очистных сооружений. При этом не возникает никаких затруднений, если осадок хорошо кондиционирован, так как фугат в этом случае обычно содержит только 0,05—0,2% взвешенных веществ.

Центрифугирование без добавок полимера приводит к тому, что в конечном счете при рециркуляции фугата с большим количеством взвешенных веществ (1—3% по сухому веществу, много очень легких и коллоидных примесей) забиваются коммуникации очистной станции, даже если предусмотрена небольшая сезонная очистка. В этом случае фугат перед рециркуляцией необходимо обрабатывать. Если обработка его не предусмотрена, он должен быть выведен из системы станции.

17.1.2.3. Ускоренное уплотнение осадка центрифугированием. Некоторые типы центрифуг можно применять для уплотнения осадка без добавления полиэлектролитов. Такой вариант обработки применим к очень гидрофильным органическим и неорганическим осадкам, концентрация сухого вещества в которых даже после длительного уплотнения в статических условиях не превышает 2—3%, а обезвоживание лишь ненамного улучшает его качество.

Уплотнение в центрифугах дает возможность получить осадок с концентрацией 5—8% по сухому веществу; центрифуги занимают небольшой объем, особенно по сравнению с обычными уплотнителями. Однако центрифуги потребляют гораздо больше

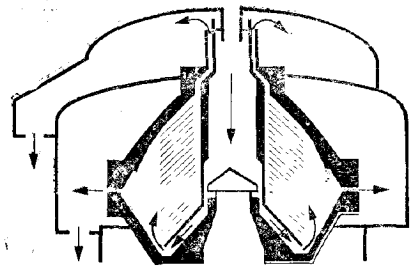


Рис. 17.35. Схема сепаратора дискового типа (поперечный разрез)

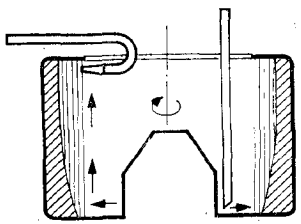


Рис. 17.36. Схема корзиночной центрифуги (поперечный разрез)

энергии; кроме того, при переходе к центрифугам ликвидируется полезное использование буферной емкости уплотнителей. Применяют несколько типов центрифуг.

Непрерывно действующие осадительные центрифуги, с очень малым углом наклона образующей конуса к центральной оси (4°). Уровень жидкостного кольца устанавливают такой, чтобы ликвидировать зону образования очень плотного осадка; тогда из конической части центрифуги можно выгружать полужидкий осадок.

Недостаток центрифуг — их низкая производительность, если осадок не обрабатывается полимерами и если при этом желательно обеспечить эффективность задержания сухого вещества более 85%. В этих условиях центрифуги работают при очень небольших скоростях.

В дисковых сепараторах (рис. 17.35) уплотненный осадок выгружается через калиброванные отверстия очень маленького диаметра (1—2 мм) при периодическом открывании корзины. Центрифуги этого типа можно применять только для гомогенных осадков, состоящих исключительно из легких коллоидных частиц (осадки водопроводных станций или активный ил от очистки воды, содержащей только растворенные примеси). Другие осадки требуется подвергать предварительному двойному процеживанию через сита с размером отверстий менее 1 мм, эффективность которых часто оказывается недостаточной.

Удовлетворительная работа сепараторов зависит от доли грубых частиц в осадке, способных забивать диск или выпускные отверстия. Сепараторы работают с большими скоростями вращения.

Корзиночные центрифуги, вертикальные или горизонтальные со скребком и отводной трубкой полностью автоматизированы. Они работают периодически с чередующимися циклами заполнения и выгрузки. Как и в непрерывнодействующих центрифугах, нагрузка по массе осадка невелика, если поддерживается приемлемая эффективность задержания сухого вещества.

Корзиночные центрифуги используют также для обезвоживания, но в этом случае желательно добавлять полимеры, что-

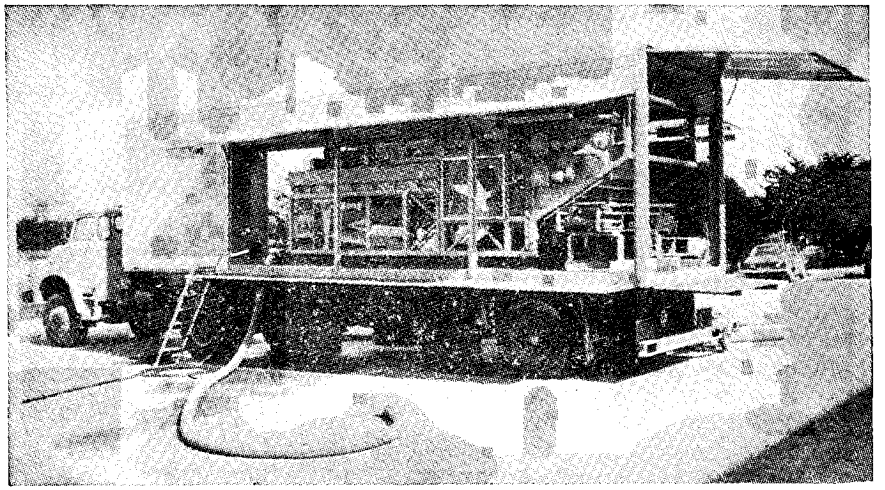


Рис. 17.37. Передвижная установка для обезвоживания осадков

бы увеличение стоимости обработки было компенсировано увеличением производительности. Эти аппараты менее подвержены износу, чем непрерывнодействующие центрифуги, так как в них нет шнека.

17.1.3. ПЕРЕДВИЖНЫЕ ОБЕЗВОЖИВАЮЩИЕ УСТАНОВКИ

Ленточные фильтр-прессы с шириной ленты менее 2 м, непрерывнодействующие осадительные центрифуги (ротор диаметром менее 52 см) и небольшие фильтр-прессы могут быть смонтированы на дорожном трайлере. На нем же устанавливают насос для подачи осадка на обезвоживание, реагентное хозяйство и щит с контролирующими приборами.

Достоинство этой системы состоит в том, что она может обслуживать несколько небольших очистных станций, которые должны иметь оборудование по стабилизации осадков с накопителями достаточной емкости, обеспечивающими хранение осадка в период работы подвижной обезвоживающей установки на другом объекте. Оценка капитальной и эксплуатационной стоимости показала, что применение передвижной установки для 3—4 очистных станций, обслуживающих население от 2000 до 10 000 в радиусе до 50 км, экономически эффективно.

17.2. СУШКА И СЖИГАНИЕ

Под сушкой обычно понимают тепловую обработку, которая заключается в удалении из осадка интерстициальной воды в результате ее испарения. Полностью высушенный конечный про-

дукт представляет собой практически сухое вещество (как органическое, так и неорганическое).

В процессе сжигания не только полностью удаляется интерстициальная вода, но и сгорают органические вещества, содержащиеся в осадке. Из всех способов переработки осадков сжигание дает наименьший по массе остаток, который представляет собой золу, не содержащую ничего, кроме неорганических компонентов осадка.

Процесс сжигания включает фазу сушки. И поскольку при этом используется теплотворная способность органической части осадка, потребность в энергии всегда меньше, чем в процессе, ограничивающемся тепловой сушкой. По этой причине тепловая сушка заслуживает внимания только в тех случаях, когда конечный продукт может быть утилизирован: либо продан как удобрение (органические осадки городских сточных вод), либо возвращен в производство (осадки промстоков).

Тепловой сушке и сжиганию обычно подвергают осадки после их механического обезвоживания (фильтрования или центрифугирования), так как стоимость удаления влаги механическим способом намного меньше, чем испарением. Однако воду можно испарить из жидкого осадка непосредственно в процессе сушки или сжигания:

- когда имеется тепловая энергия (например, отходы тепла основных производств) как в случае некоторых органических производств химической промышленности (при очистке нефти, на нефтехимических, коксохимических заводах);
- когда обработке подлежит небольшой объем жидкости с очень высоким содержанием загрязнений и при этом отсутствует какая-либо предварительная ее очистка. Испарение воды обходится сравнительно дорого и непосредственное сжигание становится экономически оправданным;
- если сжигается осадок в смеси с другими отходами, такими как бытовой мусор, которые служат дополнительным топливом;
- когда выгодно регенерировать побочные продукты сушкой или сжиганием из жидкости, которую невозможно сконцентрировать механическими способами (например, черный поток от целлюлозно-бумажных предприятий).

Так как стоимость тепловой энергии постоянно возрастает, эти процессы применяют все реже и реже.

Некоторые основные теплотехнические характеристики рассмотрены далее.

Сушка может быть прямой, когда осадок контактирует с газами сжигания, или непрямой горячим воздухом (при применении теплообменников газы сжигания — воздух или горячая вода от котлов — воздух и т. д.).

17.2.1. ТЕПЛОВОЙ БАЛАНС

В процессе прямоточной сушки все тепло поступает от внешнего источника, для чего должно потребляться топливо. В случае сжигания значительная часть тепла обеспечивается сгоранием органических веществ осадка. В некоторых условиях этого тепла может хватать для непрерывного сгорания осадка; такой осадок относят к самосгораемым. Для осадка городских сточных вод, содержащего 70% беззольного вещества в сухой массе, самосгораемость осадка ограничена предельными значениями влажности 60—70% в зависимости от типа установки для сжигания.

Общее количество тепла (кДж/кг), идущее на испарение воды, можно быстро подсчитать по формуле

$$2700 + 2{,}1\,(t - 100),$$

где t — температура, °С, при которой горячие газы покидают систему.

Баланс тепла определяют по смете, составленной с учетом расхода тепла в установке (на парообразование и перегрев воды, потери с золой, полезный нагрев воздуха для сгорания органических веществ и топлива; потери за счет радиации, а также с учетом получения установкой тепла от органического вещества осадка и подпитки топливом).

Расход воздуха должен, по возможности, соответствовать количеству, необходимому для поддержания горения, но трудно поддерживать избыток воздуха ниже 20—30%.

Тепло, которое требуется только на испарение, составит от 4600 до 6700 кДж/кг воды в зависимости от технологии сушки и конструкции установки и особенно от утилизации тепла горячих газов.

На рис. 17.38 показана зона самосгорания осадка в промышленной установке в зависимости от влажности и зольности этого осадка. Верхний предел влажности соответствует температуре газов на выходе 300 °С, нижний предел — 500 °С.

Стоимость установки сушки и сжигания прямо связана с количеством воды, подлежащей испарению. Поэтому капитальные и эксплуатационные затраты на саму печь сжигания будут в большой степени зависеть от значения влажности осадка, до которой он был предварительно обезвожен.

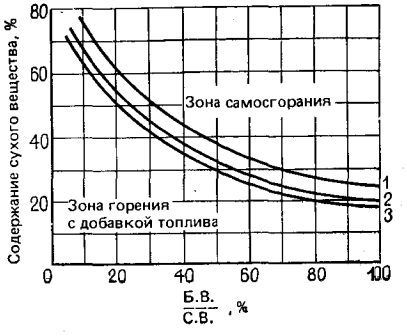


Рис. 17.38. Кривые самосгорания (беззольное вещество МДж/кг)

1 — температура газа 500°С; *2* — температура газа 400°С; *3* — температура газа 300°С

17.2.2. ОСНОВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ УСТАНОВОК, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ СУШКИ И СЖИГАНИЯ ОСАДКА

Сушилка и печь не являются единственными элементами установок для сушки и сжигания осадка. В состав установки входят (см. с. 789);

устройство для подачи осадка на установку (с регулирующей емкостью для хранения осадка или без нее; с дробилкой для разбивания комков кека или без нее; с ленточным конвейером, конвейером ковшового типа на бесконечной цепи, поршневыми насосами и т. д.);

сушилка и собственно печь или только один из этих аппаратов;

воздуходувная система или системы для работы при избыточном давлении либо при разрежении для транспорта сушильного газа (или воздуха для сушки), газов сжигания (или воздуха), воздуха для псевдоожижения, а также системы с одним или более местами подачи в сушилку или печь;

устройство для утилизации тепла газов сжигания, если это необходимо (нагревание воздуха, поддерживающего горение, или подогрев сжигаемых отходов);

вспомогательный источник тепла, который может быть расположен за пределами или внутри установки (для поддержания горения или пуска топки); он может быть прямой или непрямой (в случае сушки);

устройство для контроля процесса сушки — сжигания;

устройства для улавливания пыли: сухие (циклоны), мокрые (обрызгивание, скруббер) и электростатические;

устройство для золоудаления; последнее может быть непрерывным или периодическим; гидравлическим (перекачивание суспензии с концентрацией менее 200—300 г/л); в закрытых контейнерах (сухая зола); в открытых контейнерах (увлажненная зола).

17.2.3. ФАЗЫ СУШКИ И СПОСОБЫ ПРОВЕДЕНИЯ ПРОЦЕССА

При постоянной температуре сушки осадка процесс удаления интерстициальной воды делится на две основные стадии (рис. 17.39): быстрой сушки с постоянной скоростью (зона 1) и медленной сушки (зона 2).

В период быстрой сушки парциальное давление паров жидкости на поверхности материала равно давлению пара при рассматриваемой температуре. Вода мигрирует из объема осадка к поверхности. Вся капиллярная вода удалена. В период медленной сушки давление пара изменяется в зависимости от глубины, вследствие изменения температуры от поверхности к внутренней части материала. Образующийся пар диффундирует через поверхность верхнего слоя. В течение этого периода извлекается

вода, обладающая более высокой энергией связи.

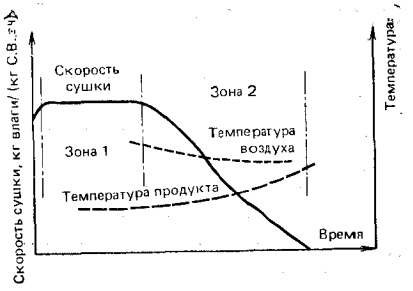


Рис. 17.39

Для гигроскопических материалов, в которых вода удерживается по существу адсорбционными и осмотическими силами, процесс сушки характеризуется в основном зоной 2. Такой характер кривой сушки часто имеют осадки городских сточных вод (особенно после предварительного обезвоживания).

Полностью высушенный материал имеет ту же самую влажность, что и влажность окружающей среды в сушилке. Практически трудно получить на выходе из промышленной сушки остаточную влажность менее 8%. Если высушенный материал хранится на открытом воздухе, даже в защищенном от дождя и снега месте, он быстро набирает воду и его влажность становится равной атмосферной влажности. Понятие «сухой материал» всегда относительно.

Степень испарения влаги возрастает:

когда парциальное давление пара в окружающем воздухе уменьшается (следовательно, когда температура повышается);

с увеличением площади поверхности высушиваемого материала;

с увеличением длительности контакта этой поверхности с воздухом.

Температурные кривые для теплоносителя и материала выглядят по-разному в зависимости от принятого в сушке прямоточного или противоточного движения теплоносителя и материала; то же самое относится и к парциальному давлению пара. В противоточных сушилках наиболее охлажденный теплоноситель контактирует с наиболее влажным материалом: условия теплообмена и эффективность использования тепла в этих сушилках лучше, чем в прямоточных.

Прямоточные сушилки не рекомендуется применять для материалов, чувствительных к температуре (из-за образования корки, как для большинства осадков городских сточных вод; в противоточных сушилках высушенный материал не может выдерживать радиации горячих газов. Это одна из причин, по которой горячие газы, контактирующие с осадком городских сточных вод, в конце процесса сушки должны иметь температуру 450 °С при температуре продукта около 200 °С.

Использование в качестве теплоносителя газов сжигания дает возможность уменьшить объем сушилок по сравнению с объемом, необходимым для сушки горячим воздухом, так как доступный градиент температур в первом случае выше. Это наи-

более широко применяемый метод в практике обработки осадков сточных вод; непрямая сушка предназначена для ценных продуктов и материалов, чувствительных к колебаниям температуры.

Для сжигания осадка предварительная сушка почти всегда имеет важное значение, если только сухой продукт не нагревается до температуры вспышки. Сушка может проводиться в отдельных аппаратах (например, с использованием в качестве теплоносителя газов сжигания) или в самой печи для сжигания.

Большинство печей для сжигания можно использовать и для сушки. Некоторые печи предназначены только для сушки.

Применяются следующие типы сушилок:

с инертным наполнителем в виде шариков, в которых горячий воздух с температурой более 150 °С продувается снизу вверх через слой шариков. Осадок движется в обратном направлении. Шнек возвращает шарики в верхнюю часть рабочего слоя;

мгновенного действия, в которых осадок, подлежащий сушке, после смешивания с уже высушенным осадком дробится и распыляется в вертикальной трубе, через которую продуваются газы сжигания с температурой 600—700 °С;

с нагревающимися элементами, в которых жидкий осадок скользит вдоль плоской или цилиндрической нагретой поверхности элемента, внутри которого циркулируют горячие газы или пар. Эти сушилки должны быть оборудованы сгребающим устройством для удаления осадка и предотвращения загрязнения поверхности нагревающих элементов. Этот тип сушилок позволяет удалить из осадков лишь часть воды.

В очень редких случаях (скорее для концентрированных растворов, чем для суспензий или собственно осадков) можно применять другие процессы концентрирования, обычно используемые в промышленности, например высокоэффективное выпаривание, при пониженном давлении или вакууме, термокомпрессия.

Наконец, лиофилизация (сушка вымораживанием) в принципе пригодна для сушки высококачественных продуктов, в частности, ее используют в пищевой промышленности. Лед, содержащийся в предварительно замороженном продукте, сублимируется в вакууме.

17.2.4. ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ПЕЧЕЙ

17.2.4.1. Многоподовые печи (рис. 17.40) наиболее часто применяют для осадков сточных вод. Они состоят в основном из комплекта плит или подов, по которым подлежащий сжиганию материал последовательно спускается. Он перемещается с пода на под с помощью вращающихся скребков, приводимых в действие центральным вращающимся валом, подсоединенным за пределами печи к двигателю.

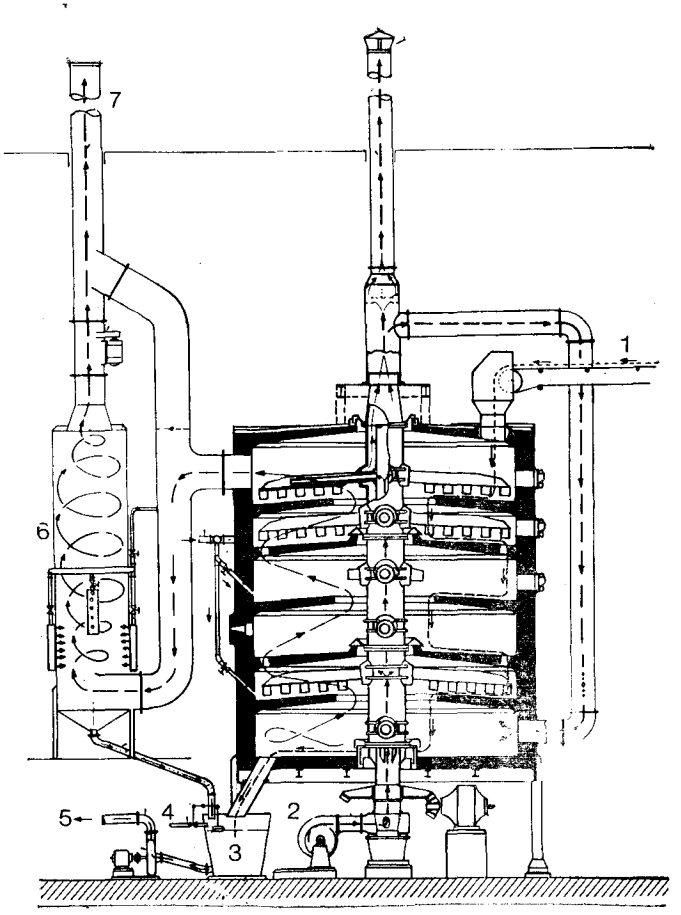


Рис. 17.40. Схема многоподовой печи

1 — подача осадка; *2* — холодный воздух; *3* — зола; *4* — добавочная вода; *5* — к лагуне; *6* — циклон для промывки газа; *7* — газы сжигания в атмосферу

Печи работают в режиме противотока и, следовательно, позволяют особенно эффективно использовать тепло. Температура газов на выходе равна приблизительно 400 °С, тогда как температура влажного осадка на верхнем сушильном поду едва лишь превышает 70 °С, так что дезодорация (дожиганием выходящих газов в дополнительной топке) обычно не требуется.

Осадок постепенно высыхает на верхних подах (осадки сточных вод высыхают до влажности 50—60%) и затем падает на под в зону сжигания (окислительную среду с температурой 760—870 °С), где целиком воспламеняется. Полное сжигание достигается на самом нижнем поду, откуда выгружается бóльшая часть золы. Зола охлаждается, контактируя с холодным воздухом, подающимся в печь для поддержания горения, и

обычно сбрасывается в золосборник, заполненный водой. Таким образом, газы сжигания имеют очень небольшую запыленность, которая может быть снижена до 250 мг/м³ обычной очисткой в мокром скруббере.

Печи с большой поверхностью теплообмена и очень значительным нагревом могут иметь диаметр до 7 м; число подов допускается от 4 до 12.

Содержание летучей золы в дымовых газах таково, что для их очистки требуется лишь небольшое количество воды. Эти печи могут быть использованы также в качестве сушилок с отбором продукта с боковой стороны самого нижнего сушильного пода. В подовую печь, предназначенную для сжигания, можно подавать отходы жиров, пену или отбросы с решеток, которые с постоянной скоростью поступают на один из подов, расположенных выше зоны сжигания.

Эти печи обладают значительной тепловой инерцией с вытекающими отсюда недостатками и достоинствами: большой расход топлива при запуске печи после длительной остановки и небольшое потребление топлива для пуска после остановки печи на 1—2 сут.

Осадок загружают в верхнюю зону через дозирующий бункер с конвейером перед ним. Так же, как и для всех других типов печей, кек после фильтр-прессов сначала подвергают дроблению, чтобы обеспечить равномерную загрузку печи.

Поды печи можно также использовать для регенерации гранулированного активированного угля (работа при разрежении с добавкой пара) и подготовки к повторному использованию известковых осадков. Негашеную известь можно получить спеканием осадка, полученного от обработки стоков большими дозами извести.

17.2.4.2. Вращающиеся печи — наиболее популярный в промышленности тип аппаратов для сушки и сжигания, т. е. процессов, применяемых раздельно или в сочетании (в горнодобывающей промышленности, производстве чугуна и стали, цемента и т. д.). Сушилки легко эксплуатировать и можно использовать для обработки от 1 до 10 т/ч предварительно обезвоженного осадка.

Цилиндрическую вращающуюся сушилку устанавливают под небольшим углом к горизонтали; обычно она работает на противотоке (рис. 17.41). Зона сжигания футерована огнеупорным материалом. При температуре сжигания от 900 до 1000 °С и избытке воздуха, равном 50%, отходящие газы от сжигания осадка сточных вод имеют температуру около 300 °С.

Бóльшая часть золы, охлажденной с помощью воздуха, подающегося для поддержания горения, возвращается в нижний конец печи и выгружается в вагонетку для вывоза. Газы, прошедшие циклон, поступают на промывку. В целом установка

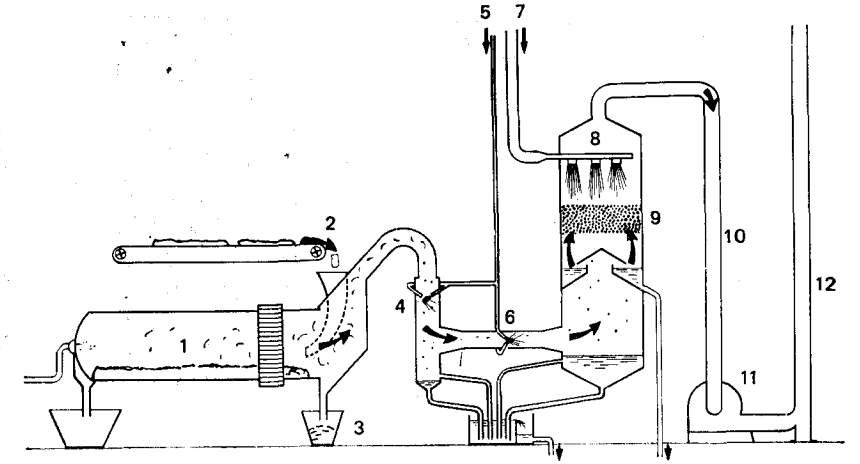


Рис. 17.41. Принцип работы вращающейся печи

1 — печь; *2* — подача осадка; *3* — пыль; *4* — спринклер для насыщения и промывки; *5* — промывная вода; *6* — ороситель; *7* — охлаждающая вода; *8* — спринклеры; *9* — концентрированная масса; *10* — промытая и охлажденная струя газа; *11* — вентилятор; *12* — труба

работает под разрежением, создаваемым вентилятором, просасывающим воздух через систему.

Работу сушилки контролируют в основном по температуре отходящих газов, которая не должна превышать допустимых пределов. В таких печах можно сжигать отбросы с решеток, желательно после предварительной резки или дробления.

Для сжигания осадков, содержащих жиры или масла, прямоточный режим работы печи является самым лучшим. В этом случае печь не может быть использована как сушилка.

Вращающиеся печи просты по конструкции и дешевы как в монтаже, так и в работе в качестве сушилок или для сжигания. Термический к. п. д. очень высок, но потери тепла в окружающую среду за счет радиации значительны; расход тепла существенно возрастает при периодической работе установки.

Вследствие вращения печи внутреннюю облицовку ее желательно делать из жаропрочной стали.

17.2.4.3. Печи с псевдоожиженным слоем обладают важным достоинством — в них отсутствует контакт горячих газов с движущимися механическими частями. Здесь обеспечивается полная дезодорация газов сжигания, но потери тепла значительны и пренебречь этим фактором нельзя.

Работа печи «Пиробед» показана на рис. 17.43. Они нуждаются в более строгом контроле, чем многоподовые или вращающиеся печи, так как имеют меньший объем.

Псевдоожижение, широко используемое в химической, горнорудной и угольной промышленностях, для сжигания осадков от

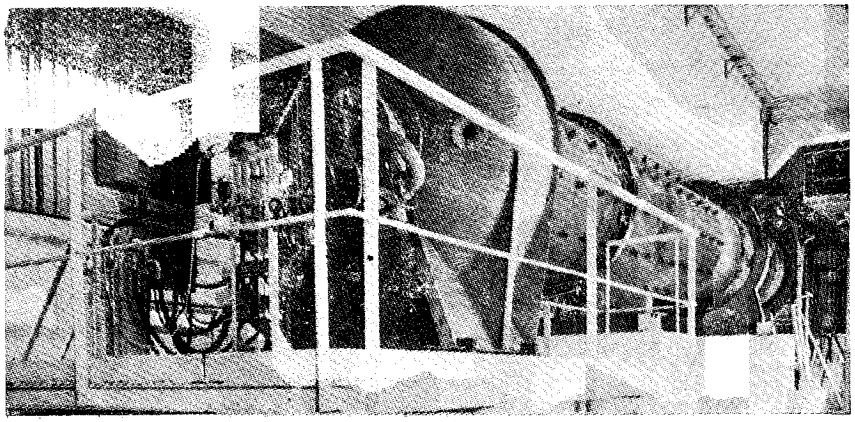


Рис. 17.42. Вращающаяся печь для сушки осадка и сжигания его. Станция очистки сточных вод в Бьяритц, Франция

обработки воды применяют недавно. Даже в присутствии небольшого избытка воздуха достигается полное сжигание.

Осадок подается в слой инертного материала — обычно песка, поддерживаемый во взвешенном состоянии восходящим потоком воздуха, инжектируемым у дна через распределительную решетку с многочисленными дефлекторами. Глубина инертного слоя в состоянии покоя составляет от 0,5 до 0,8 м. Благодаря перемешиванию инертного материала осадок легче разбивается на мелкие частички.

Псевдоожижение должно быть настолько интенсивным, чтобы тепло быстро рассеивалось, но потерь песка не происходило. По этой причине поток воздуха через распределительную решетку может изменяться лишь в ограниченных пределах.

Сгорание большей части высушенных очень мелких частиц и беззольных веществ заканчивается в свободной зоне над псевдоожиженным слоем, где температура достигает 300 °С, т. е. на 100—200 °С выше, чем в слое.

С повышением влажности осадка, подлежащего сжиганию, более равномерным должно быть распределение поступающего осадка и любого дополнительного теплоносителя над поверхностью инертного слоя. Тем не менее для сжигания в псевдоожиженном слое требуется:

улавливание всего сгоревшего материала в форме летучей золы. Это достигается обработкой в циклоне с последующей промывкой газа или одной промывкой. Циклоны, работающие под давлением, должны быть герметичными. Суспензию золы, образующуюся в процессе мокрой очистки газа и содержащую 2—4% сухого вещества, следует обрабатывать в лагунах. Объ-

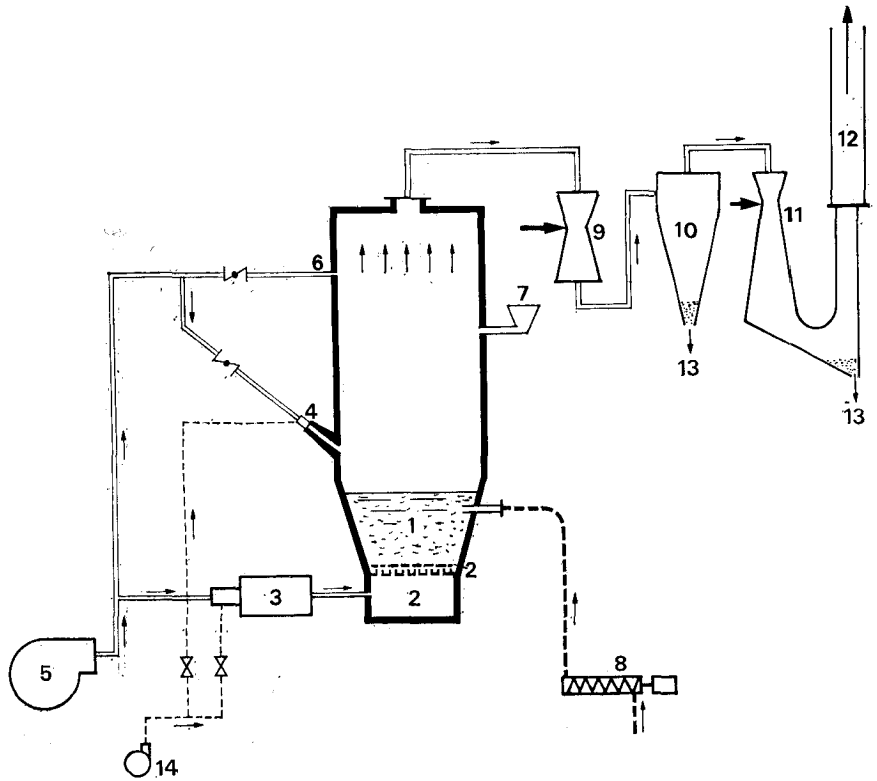


Рис. 17.43. Схема работы печи с псевдоожиженным слоем без утилизации тепла дымовых газов

1 — псевдоожиженный слой; *2* — камера дутья; *2'* — воздухораспределительная решетка; *3* — предварительный нагреватель; *4* — вспомогательная топка; *5* — вентилятор; *6* — вторичная подача воздуха; *7* — загрузка песка; *8* — насос для подачи осадка; *9* — кондиционер дымовых газов; *10* — циклон; *11* — промыватель; *12* — труба; *13* — зола; *14* — насос для подачи топлива

емные, несгораемые вещества нельзя вводить в печь (например, отбросы с решеток очень трудно выгрузить из аппарата);

инжекция воздуха при достаточно высоком давлении, чтобы компенсировать потери в псевдоожиженном слое;

утилизация тепла отходящих газов, если требуется высокий термический к.п.д. Необходимо использовать высококачественные теплообменники; если температура отходящих газов ниже 500 °С, применять теплообменники невыгодно. Утилизированное тепло потребляется на подогрев воздуха, подающегося в печь, примерно до 400 °С или в бойлерах.

Печи с псевдоожиженным слоем можно легко выключать на ночь; они потребляют очень мало топлива при повторном пуске частично из-за небольшого объема нагреваемой камеры, частично потому, что масса огнеупорной футеровки и масса песка под-

держивают высокую температуру по всей камере в течение длительного времени после остановки печи.

17.2.4.4. Сушилки мгновенного действия. В этих аппаратах осадок распыляется в виде очень мелких частиц в токе воздуха, нагретого до температуры воспламенения сухого вещества осадка. Вследствие низкой тепловой инерции сушилки обычно работают при большом избытке воздуха и постоянном расходе.

Они имеют низкий термический к.п.д.; их используют при небольших расходах осадка и в тех случаях, когда стоимость тепловой энергии невелика (например, для осадков от нефтеперерабатывающих заводов). Чтобы снизить стоимость топлива, поддерживающего процесс, распылительные сушилки проектируют для осадков, содержащих 15% сухого вещества.

Непосредственное сжигание применимо также для высококонцентрированных жидкостей или жидкостей, содержащих токсичные примеси; физико-химическая или биологическая обработка таких отходов иногда стóит дорого и может сопровождаться образованием значительных объемов осадков. Эти методы очистки могут оказаться даже непригодными. В некоторых случаях растворы, подлежащие сжиганию, содержат такое количество солей, что технология сжигания в печах становится очень дорогой и трудоемкой.

17.2.5. ПИРОЛИЗ

При пиролизе осадки сначала высушивают, а затем нагревают без доступа воздуха. Беззольные вещества отгоняют в виде очень горючего газа. «Связанный углерод», который обычно не летуч, также может быть газифицирован обычно с помощью пара, который облегчает реакцию.

Газы пиролиза, не использованные для поддержания температуры в зоне пиролиза, сжигают в топке; образующаяся тепловая энергия может быть использована для получения пара или восполнения затрат энергии.

Установка для пиролиза имеет более сложную конструкцию, но обеспечивает более высокий тепловой к.п.д. Практически избыток воздуха, необходимый для сжигания газов пиролиза, меньше того, который требуется для сжигания твердых веществ. Для сжигания твердых веществ в стандартных печах иногда может потребоваться 100%-ный избыток воздуха. Этот метод потенциально очень ценен, так как стоимость энергии продолжает увеличиваться.

17.2.6. ОБРАБОТКА ДЫМОВЫХ ГАЗОВ

Цель обработки дымовых газов, образующихся в установках сушки и сжигания, — удаление пыли, запахов и дымовых струй. Чем ниже первоначальная концентрация пыли в дымовых газах, тем быстрее можно ее удалить.

В зависимости от местных условий процесс очистки состо
из одной или более фаз: сухой очистки в циклонах, мокрой о
стки, удаления пыли электростатическим методом.

Мокрая газоочистка осуществляется в скрубберах-венту
в аппаратах с водяной завесой или в противоточных систе
тарельчатого типа.

Электростатический метод удаления пыли обычно приме
в случаях, когда требуется снизить содержание пыли в дымо
газах до концентрации менее 100 мг/м^3.

При устранении запаха принимают во внимание фак
субъективности; чем ниже температура газа и влажность оса
на выходе из зоны сушки, тем больше опасность появления
пахов.

В сушилках и печах, где обеспечивается равномерное и
степенное высушивание и должным образом отведение газ
также заданный цикл обработки осадка, вероятность появле
запахов меньше, чем в менее сложных аппаратах (например
вращающихся печах противоточного типа). В более усовер
ствованных конструкциях вода может испаряться в более хо
ной зоне, тогда как беззольные вещества, прежде чем они бу
выгружены из аппарата, переходят в газовую фазу в зоне,
могут воспламениться, так как температура газа еще достато
высокая.

В неусовершенствованных сушильных агрегатах все отхо
щие газы из сушилки или печи должны быть нагреты, по кр
ней мере, до 650 °С с целью ликвидации запаха. В печах с п
доожиженным слоем этот показатель всегда удовлетворяет
бованиям без каких-либо дополнительных мер.

С точки зрения дезодорации преимущества пиролиза та
очевидны, так как газы целиком могут быть нагреты до высо
температуры в камере дожигания.

Причины необходимости ликвидации струек дыма чисто э
тические. Иногда это вызвано очень строгими требованиями
щиты окружающей среды, но излишне с точки зрения гиги
или здоровья. Появление струек дыма связано с яркостью о
жающего воздуха, турбулентностью воздуха около трубы,
ростью выхода газа и абсолютной влажностью окружающ
воздуха. Если весь газ интенсивно нагреть перед выбросом,
пература дымовых газов в атмосфере вряд ли будет дости
критического значения, ниже которой конденсируются капе
воды, при интенсивном рассеивании, и струйки дыма будут
видимы. Однако это связано с большими затратами энергии.

Обычно предпочитают предварительно охлаждать га
целью конденсации части воды, содержащейся в нем. Затем
зы снова слегка нагревают, так что газовый выброс имеет с
сительную влажность значительно ниже концентрации нас
ния при данной температуре.

17.2.7. ОСАДОК И ДОМАШНИЙ МУСОР

Кроме возможности компостирования как метода совместной обработки осадка сточных вод и домашнего мусора, сжигание осадка (или сушка) может быть полностью совмещено со сжиганием мусора.

Если осадок после механического уплотнения или обезвоживания только сушится, печи для сжигания мусора могут прямо или косвенно обеспечивать необходимым теплом сушилку. В этом случае влажные газы от сушилки могут быть полностью дезодорированы при подаче их в печь сжигания. Если осадок подлежит сжиганию, предварительно высушенный осадок (высушенный так, как описано выше) может быть подан в печь для сжигания мусора или может быть применено раздельное сжигание.

Необработанный домашний мусор имеет теплоту сгорания от 7500 до 8400 кДж/кг, и после удаления из него металлических включений с ним можно теоретически без использования дополнительного топлива сжечь свежий осадок, если его влажность около 90% и зольность 30%.

Способ совместного сжигания уплотненного осадка и домашнего мусора уже применялся, но при таком модифицированном процессе сжигания возникает ряд проблем. Например, если для сжигания осадка используется многоподовая печь, то мусор необходимо сначала тщательно измельчить. В мусоросжигательные печи осадок должен поступать в порошкообразном виде, чтобы его можно было смешать с мусором; печь должна быть переоборудована так, чтобы исключить попадание несгоревшего осадка в золоотвал при слишком быстром прохождении через печь. Смесь из мусора и обезвоженного осадка, поступающая в печь, должна иметь однородную консистенцию.

В основном технологический процесс на установке, спроектированной для одновременного сжигания мусора и осадка, будет более гибким, если сжигание мусора проводить в отдельном аппарате от сушки (или сушки и сжигания) осадка. Однако должна быть обеспечена передача необходимого количества тепла.

Раздельная работа двух аппаратов может оказаться полезной в непредвиденных случаях или когда они работают с очень разными скоростями.

18. ХРАНЕНИЕ И ДОЗИРОВАНИЕ РЕАГЕНТОВ

18.1. ОСНОВНЫЕ РЕАГЕНТЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ПРИ ОЧИСТКЕ ВОДЫ

При очистке воды используют множество химических реагентов, которые делятся на две группы:

- специальные: коагулянты (сульфат алюминия, хлорид железа и т. д.); окислители и реагенты, применяемые для обеззараживания (хлор, озон и т. д.); флокулянты (активная кремнекислота, полиэлектролиты);
- реагенты общего назначения: щелочные (сода, известь и т. д.) и кислоты (серная и соляная).

В книге приведены только некоторые сведения об основных реагентах.

18.1.1. СПЕЦИАЛЬНЫЕ РЕАГЕНТЫ

Сульфат алюминия используют в качестве коагулянта. Его применяют в твердом или жидком виде. В твердом виде он представляет собой дробленые пластины, гранулы или порошок; теоретическая формула сульфата алюминия — $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$. Коагулянт обычно характеризуется содержанием оксида алюминия Al_2O_3, которое приблизительно составляет 17%. Кажущаяся плотность порошкообразного сульфата алюминия около 1000 кг/м^3.

В жидком виде, как и в твердом коагулянт характеризуется содержанием оксида алюминия, концентрация которого обычно составляет 8—8,5%, что эквивалентно концентрации сухого продукта 48—49% или содержанию 630—650 г $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ в 1 л водного раствора.

Так как сульфат алюминия является солью слабого основания (гидроксида алюминия) и сильной кислоты (серной кислоты), его водные растворы — кислые; значение pH изменяется от 2 до 3,8 в зависимости от молярного соотношения сульфатов и оксида алюминия. Кислотность растворов сернокислого алюминия необходимо учитывать при их хранении, приготовлении и дозировании.

Основной полихлорид алюминия (В.А.Р.С). Используют в качестве коагулянта. Его приготовляют медленной нейтрализацией хлорида алюминия содой; в процессе нейтрализации получают растворы полимеров алюминия.

Хлорид алюминия $AlCl_3$ поставляют в твердом и жидком виде; обычно его применяют в жидком виде (плотность 1,29 кг/дм^3; содержание Al_2O_3 — 11,4%).

Так как растворы хлорида алюминия — кислые, при их приготовлении и дозировании следует применять оборудование из полимерных материалов.

В.А.Р.С. приготовляют по мере необходимости; реагент не подлежит длительному хранению.

Хлорид железа (FeCl₃) используют в качестве коагулянта. Его производят в твердом и жидком виде, но используют в основном в жидком виде. В твердом виде он представляет собой гигроскопичное кристаллическое вещество желтовато-коричневого цвета (его формула $FeCl_3 \cdot 6H_2O$). Хлорид железа нельзя хранить возле источников тепла, так как он растворяется в своей кристаллизационной воде при 34 °С.

Жидкий товарный продукт содержит около 40% чистого $FeCl_3$. Чтобы избежать путаницы между концентрацией $FeCl_3$ в чистом и товарном продуктах, лучше выражать ее в эквивалентах Fe, т. е. 20,5% для твердого продукта и около 14% для товарного водного раствора. Водные растворы хлорида железа быстро восстанавливаются до хлорида двухвалентного железа $FeCl_2$ в присутствии железа. Это обусловливает сильное коррозионное действие продукта на сталь и необходимость защиты резервуаров для хранения, приготовления и дозирования растворов.

Сульфат железа (II) ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$) используют в качестве коагулянта. Сульфат двухвалентного железа представляет собой зеленый порошок с кажущейся плотностью около 900 кг/м³. Он полностью растворим в воде и приготовление водных растворов не вызывает трудностей. Реагент содержит около 19% железа; поскольку pH 10%-ного раствора составляет приблизительно 2,8, металлические резервуары для хранения, приготовления и дозирования должны быть защищены от коррозии. При использовании сульфата двухвалентного железа также часто применяют резервуары из полимерных материалов.

Сульфат железа (III) $Fe_2(SO_4)_3$ применяют в качестве коагулянта. Этот реагент представляет собой белый порошок, хорошо растворимый в воде, с кажущейся плотностью 1000 кг/м³. В водных растворах подвергается гидролизу, образуя серную кислоту. Так же как и при использовании сульфата двухвалентного железа, следует принимать меры предосторожности из-за высокой кислотности реагента.

Хлорсульфат железа ($FeClSO_4$) используют в качестве коагулянта. Представляет собой темный коричневато-красный концентрированный раствор с плотностью около 1500 кг/м³. Товарный продукт в жидком виде содержит приблизительно 13—14% железа, или около 200 кг/м³.

Раствор — кислый (370 кг/м³ SO_4^{2-} и 125 кг/м³ Cl^-). Как и при использовании сульфата двухвалентного железа, металлические резервуары, предназначенные для хранения, приготовления и дозирования реагента, необходимо защищать от коррозии или выполнять их из полимерных материалов.

Силикат натрия (Na_2SiO_3) применяют в качестве флокулянта и как ингибитор коррозии. Этот реагент поставляют в твердом или жидком виде, более широко используя в жидком виде, так как раствор проще приготовляется.

Жидкий силикат натрия характеризуется массовым отношением R_{ma} и плотностью. Массовое отношение равно отношению массы диоксида кремния к массе оксида натрия $R_{ma} = SiO_2/Na_2O$. С уменьшением значения R_{ma} возрастает щелочность раствора: силикаты обычно подразделяют на нейтральные ($R_{ma} < 3$) и щелочные ($R_{ma} \geqslant 3$).

Кремнеземистый модуль — это отношение числа молей диоксида кремния и оксида натрия: $R_{mo} = 1{,}0323\ R_{ma}$.

Концентрация растворов характеризуется процентным содержанием n $SiO_2 \cdot Na_2O$ в общей массе раствора.

Вязкость раствора силиката натрия возрастает с увеличением отношения SiO_2/Na_2O и с понижением температуры.

Характеристики основных применяемых товарных силикатов натрия приведены в табл. 18.1.

ТАБЛИЦА 18.1

Концентрация силиката натрия, град Боме	Концентрация силиката натрия, %	Массовое отношение	Плотность, кг/м³	Вязкость при 20 °С, МПа·с
35—37	24—26	3,3—3,4	1320—1340	40—70
38—40	26,5—28,5	3,2—3,3	1350—1380	100—200
40—42	27,5—29,5	3,1—3,2	1380—1410	180—300

При получении активной кремнекислоты важно знать процентное содержание диоксида кремния в силикате натрия и массовое отношение для каждого типа силиката натрия, так как по этим данным устанавливают массу активной кремнекислоты и массу кислоты, необходимой для частичной нейтрализации силиката натрия.

Силикаты натрия нельзя хранить в оцинкованных емкостях, поскольку происходит их взаимодействие с цинком, сопровождающееся выделением водорода.

Карбонат натрия (Na_2CO_3) используют для регулирования щелочности. Его применяют в виде белого безводного порошка, растворимого в воде; кажущаяся плотность изменяется от 500 до 700 кг/м³ в зависимости от степени уплотнения. Он имеет относительно невысокую растворимость (около 100 г/л при 20 °С), легко разлагается большинством кислот.

Бикарбонат натрия ($NaHCO_3$) используют для регулирования общей щелочности. Его применяют в порошкообразном ви-

де; он имеет плотность 800—1200 кг/м³ в зависимости от степени уплотнения; обладает относительно невысокой растворимостью (96 г/л при 20 °С).

Водорастворимые полимеры используют в качестве флокулянтов. Применяют в порошкообразном или жидком виде. Подразделяют на анионные, катионные (с большим диапазоном заряда) или нейтральные. Благодаря большому числу флокулянтов и разнообразию их свойств в каждом конкретном случае необходимо проводить выбор флокулянта на основе лабораторных испытаний.

Порошкообразные флокулянты приготовляют в виде суспензий концентрацией 2—10 г/л при минимальном времени контакта 30—60 мин и дозируют в виде суспензий концентрацией 0,1—1 г/л. Срок хранения суспензии не должен превышать одну неделю.

Жидкие полиэлектролиты вводят при тех же концентрациях, выраженных по сухому продукту. Их растворимость изменяется в широком диапазоне; они имеют высокую вязкость (до 10 Па·с при концентрации 5 г/л). Кажущаяся плотность составляет от 300 до 600 кг/м³.

Полиэлектролиты обычно вызывают коррозию незащищенной стали.

Перманганат калия ($KMnO_4$) используют как обеззараживающий реагент и для окисления марганца в воде. Его применяют в виде порошка плотностью 800—1200 кг/м³ в зависимости от степени уплотнения. Он обладает низкой растворимостью: 5 г/л при 20 °С после контакта в течение 15 мин и 30 г/л при 20 °С после контакта в течение 1 ч. При 8 °С потребуется 3,5 ч, чтобы получить последнюю из указанных концентраций (цифра, рекомендованная для средней минерализации, общая щелочность 4 мг-э/л).

Емкости для перманганата калия следует выполнять из полимерных материалов или покрывать эбонитом, если они стальные.

Хлорит натрия ($NaClO_2$) используют в смеси с хлором или соляной кислотой для обеззараживания воды. В результате реакции образуется диоксид хлора. Применяют в виде порошка, содержащего 50—80% $NaClO_2$ или в виде раствора, содержащего около 24—25% $NaClO_2$ (300 г/л). Он обладает хорошей растворимостью — около 550 г/л при 20 °С.

Хлорит натрия и в жидком, и в твердом виде следует хранить в емкостях из инертных материалов: поливинилхлорида, полиэтилена, стекла, керамики, фарфора или содержащей молибден нержавеющей стали.

Порошкообразный продукт не должен вступать в контакт с восстановителями, особенно органическими веществами: волокном, бумагой, деревом и т. д. (имеется опасность возгорания или взрыва).

Неразбавленный хлорит натрия категорически запрещается смешивать с концентрированной кислотой.

Гипохлорит натрия (NaClO) используют как обеззараживающий реагент. Товарный продукт (жавель) содержит около 150 г/л активного хлора. Этот реагент следует разбавлять мягкой водой, чтобы предотвратить выпадение в осадок нерастворимых карбонатов. Гипохлорит натрия — нестабильное вещество, которое разлагается под действием тепла и света, поэтому его следует защищать от всех источников света.

Многие металлы, даже в ничтожно малых количествах, действуют как катализаторы на процесс разложения гипохлорита натрия. Поэтому не допускается его контакт с обычной и нержавеющей сталью, медью, никелем, марганцем, кобальтом и их сплавами.

Гипохлорит кальция ($Ca(OCl)_2$) используют как обеззараживающий реагент. Обычно его применяют в твердом (порошкообразном) виде. Он может содержать 92—94% $Ca(OCl)_2$, что соответствует 650—700 г/кг активного хлора. Кажущаяся плотность около 1000 кг/м³. Обладает низкой растворимостью.

Гипосульфит натрия ($Na_2S_2O_3$) используют для восстановления хлора и его кислородсодержащих производных. Его применяют в виде безводного порошка плотностью 1000—12000 кг/м³ в зависимости от степени уплотнения. Хорошо растворим в воде — около 700 г/л при 20 °С. Водные растворы гипосульфита натрия имеют слабощелочную реакцию; он разлагается кислотами с выделением SO_2 и выпадением в осадок серы.

Бисульфит натрия ($NaHSO_3$) используют как восстановитель для перевода солей меди (II) в соли меди (I), действует на многие органические вещества, разлагая и обесцвечивая их. Промышленность выпускает его в виде водных растворов с запахом сернистого ангидрида. Он характеризуется количеством (в процентах) сернистого ангидрида, который способен выделить. Обычно растворы содержат 300 г/л SO_2. Бисульфит натрия вызывает коррозию чугуна и многих сортов стали, поэтому резервуары для приготовления и дозирования бисульфита натрия должны быть выполнены из стали с защитным покрытием или полимерных материалов.

Кислоту Каро (H_2SO_5) *(мононадсерную кислоту)* используют для удаления цианидов. Товарная кислота Каро представляет собой бесцветную жидкость с плотностью 1,3 кг/дм³, концентрация H_2SO_5 составляет 200 г/л, содержит более 15% NH_4. Кислота Каро кристаллизуется при температуре около 25 °С; для ее хранения и дозирования используют резервуары из полимерных материалов.

18.1.2. РЕАГЕНТЫ ОБЩЕГО НАЗНАЧЕНИЯ

Серную кислоту (H_2SO_4) используют для регенерации катионитовых фильтров, корректировки pH и приготовления активной кремнекислоты. Товарную серную кислоту поставляют в виде водных растворов различных концентраций. Техническая кислота, обычно используемая при обработке воды, имеет относительную массу 1,81—1,83, среднюю плотность 1830 кг/м³ и содержит 92—98% H_2SO_4 по массе. Ее вязкость при 20 °С составляет 25 МПа·с.

При разбавлении серной кислоты водой выделяется значительное количество тепла, что обусловливает необходимость соблюдения мер предосторожности. В частности, всегда следует кислоту приливать к воде, а не наоборот.

Водные растворы серной кислоты вызывают коррозию металлов и стали. Поэтому для приготовления и дозирования растворов необходимо использовать специальные стали или полимерные материалы.

При концентрациях, превышающих определенную величину, серная кислота перестает действовать как сильная кислота и может храниться в резервуарах, выполненных из обычной низкоуглеродистой стали и защищенных против попадания влажного воздуха.

Соляную кислоту (HCl) используют для регенерации катионитовых фильтров, корректировки pH и приготовления диоксида хлора. Техническая кислота, применяемая при обработке воды, содержит 31—36% HCl по массе и имеет плотность 1170 кг/м³ при 15 °С.

Раствор соляной кислоты — сильная кислота, которая в горячем состоянии действует на все обычные металлы (с выделением водорода), а в холодном состоянии — на большинство из них. Поэтому для хранения соляной кислоты стальные резервуары должны иметь защитные покрытия или следует применять емкости из некоторых полимерных материалов.

Негашеную известь (CaO) используют для нейтрализации и декарбонизации воды. В порошкообразном виде ее применяют при очистке воды. Она имеет преимущества перед гашеной известью: более низкую стоимость и требует меньше места для хранения реагента в расчете на одинаковое количество ионов кальция. Но щелочные свойства негашеной извести требуют соблюдения мер предосторожности при хранении и работе с ней.

Перед использованием реагента необходимо гашение извести водой для получения известкового молока. Гашение производят в специальном смесителе. Реакция гашения экзотермическая.

Кажущаяся плотность изменяется от 800 до 1200 кг/м³. Негашеная известь должна содержать не менее 90% окиси кальция, количество нерастворимых веществ (карбоната кальция, диоксида кремния) не должно превышать 5%.

Растворимость негашеной извести приведена в табл. 26.10. Применение извести в кусках или в гранулах требует сложной аппаратуры.

Гашеную известь ($Ca(OH)_2$) используют для тех же целей, что и негашеную. Порошкообразную известь, используемую при очистке воды, получают путем гашения негашеной извести, если ее химическое сродство к воде сведено к нулю. В основном она состоит из гидроксида кальция, гидроксида магния и примесей (карбонатов кальция и диоксида кремния). Порошкообразная известь характеризуются размером частиц, выраженным номером сита:

Номер сита	*Размер частиц, мм*
80	<0,197
100	<0,160
120	<135
150	<100
200	<0,080
300	<0,050

Кажущаяся плотность извести изменяется от 400 до 600 кг/м³. Ее растворимость в воде уменьшается с понижением температуры (см. табл. 26.10).

Каустическую соду (NaOH) используют для нейтрализации и для регенерации анионитовых фильтров. Ее применяют в твердом виде (куски, чешуйки) или в жидком (щелоки различных концентраций). Каустическая сода в виде чешуек имеет кажущуюся плотность около 800 кг/м³ и содержит в среднем 98% чистого вещества.

Работать с каустической содой следует осторожно, так как при приготовлении растворов выделяется значительное количество тепла: 1,066 кДж/кг NaOH при конечной концентрации 5%.

Товарные щелоки характеризуются концентрацией NaOH; с понижением температуры они легко кристаллизуются, поэтому рекомендуется подогревать баки для хранения растворов каустической соды или создавать условия, в которых предотвращается снижение температуры до температуры кристаллизации (табл. 18.2).

ТАБЛИЦА 18.2

Концентрация каустической соды, %	Хранение в металлических баках при температуре, °С	
	<50	⩾50
⩽50	Незащищенная сталь, с содержанием углерода 0,17%	При 50 °С еще может применяться нержавеющая сталь
>50	Никель	Никель

Сведения о материалах, которые можно использовать для хранения реагентов, приведены в табл. 18.3.

ТАБЛИЦА 18.3

Реагенты	Емкости из незащищенного бетона	Стальные резервуары			Емкости из полимерных материалов	
			покрытия из			
		незащищенные	эпоксид., хлорсульфированного полиэтилена	эбонита	эпоксидных, поливинилхлоридных, полиэтиленовых высокой плотности, полипропиленовых	полиэфирных, винилэфирных
Серная кислота:						
⩽60%			x			
⩾20%						x
⩾92%		x				
концентрированная при нормальной температуре						
при любых концентрациях				x		
					x	
Соляная кислота			x	x	x	
NaOH<50%						
t<50 °C		x				
Силикат натрия	x	x				
Сульфат алюминия			x	x	x	x
Хлорид железа			x	x	x	x
Перманганат калия			x	x	x	x
Гипохлорит натрия			x	x	x	x
Бикарбонат натрия					x	x
Хлорит натрия					x	x
Полиэлектролиты					x	x

18.2. ХРАНЕНИЕ РЕАГЕНТОВ

Методы хранения реагентов, применяемых в технологии очистки воды, зависят от их вида: порошки, растворы, газы или сжиженные газы.

18.2.1. ХРАНЕНИЕ РЕАГЕНТОВ В ПОРОШКООБРАЗНОМ ВИДЕ

Наиболее простой способ хранения порошкообразных реагентов — в мешках на специальных складах. Из-за необходимости выполнения погрузочно-разгрузочных работ он приемлем только для небольших станций. На водоочистных станциях средней и большой производительности порошкообразные реагенты хранят в контейнерах, бункерах или башнях типа силосных, размеры которых зависят от габаритов станции и периода времени, в течение которого станция должна работать без подвоза реагентов; бункеры загружают с грузовиков или из железнодорожных вагонов.

Бункеры применяют круглые с коническими днищами из металла, армированного железобетона или полиэфира, армированного стекловолокном; они загружаются с помощью механических или чаще пневматических устройств из цистерны, в которой реагент находится в псевдожидком состоянии и под давлением воздуха, как жидкость, перетекает в бункер.

Применяют, кроме того, метод подачи, при котором реагент вводится через питатель с вращающейся крыльчаткой в контур с низким давлением воздуха. В обоих случаях давление воздуха ниже 0,1 МПа, а расход составляет около 500 м³/ч. Реагент подается в верхнюю часть бункера и отделяется от воздуха, который должен быть очищен от пыли перед выпуском в атмосферу.

Для механического заполнения бункера могут быть использованы ленточные или ковшовые транспортеры. Но они не вполне пригодны для транспортировки таких пылящих реагентов, как известь или активный уголь.

Некоторые реагенты имеют свойство уплотняться при хранении, образуя своды, из-за чего их извлечение значительно усложняется.

Эти трудности обычно преодолевают двумя способами: либо в нижней части бункера располагают несколько надувных оболочек, которые по очереди наполняют воздухом, чтобы отодвинуть реагент от стенок и предотвратить образование сводов, либо с помощью сухого сжатого воздуха содержимое бункера в его нижней части приводят в псевдожидкое состояние.

При хранении небольшого количества реагентов в металлических бункерах можно избежать образования сводов, если в конической или пирамидальной части бункера установить механический вибратор периодического действия, мощность которого соответствует размеру бункера.

Воздух, который используют для транспортировки или псевдоожижения реагентов, должен быть полностью очищен от пыли перед выпуском в атмосферу. Для этого обычно применяют тканевые фильтры, располагая их над бункером в вентилируемой камере.

Уровень реагента в бункере контролируют различными способами; например, может быть использован свободно подвешенный двигатель, который вращает лопасть. При наличии реагента возрастает момент сопротивления, который вызывает вращение корпуса двигателя; это вращение обнаруживается электрическим датчиком. В отсутствии реагента корпус возвращается в свое нормальное положение.

Для определения минимального уровня реагента в бункере можно использовать емкостные системы, которые обнаруживают разность диэлектрических проницаемостей реагента и воздуха. Минимальный уровень определяют также с помощью мембраны, которая деформируется под действием массы реагента, в ре-

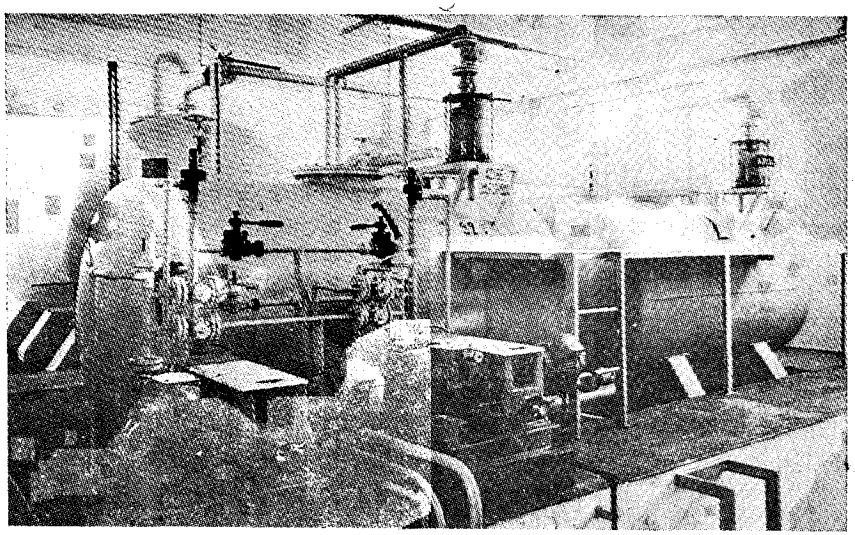


Рис. 18.1. Емкости для хранения реагентов и насосы-дозаторы. Водопроводная станция Ла Рош (La Roche), г. Нант (Франция), производительность 11700 м³/ч

зультате чего приводится в действие электрический переключатель.

Для получения непрерывной информации об уровне реагента используют более сложные системы с применением тензодатчиков или пьезоэлектрических приборов.

Другие системы для измерения уровня сухих реагентов основаны на применении ультразвука или гамма-лучей.

Для извлечения реагентов из бункеров применяют питатели с вращающейся крыльчаткой, шнеки, разгружатели пластинчатого или вибрационного типа, воздушные шиберы, автоматические клапаны. Бункеры малой емкости можно опорожнять вручную через обыкновенный шибер.

Порошкообразные реагенты можно хранить в герметичных контейнерах, заполняемых изготовителем. Контейнеры изготовляют из стали или синтетического каучука. Этот метод поставки и хранения особенно удобен для станций малой или средней производительности.

18.2.2. ХРАНЕНИЕ ЖИДКИХ РЕАГЕНТОВ

Жидкие реагенты, предназначенные для небольших станций, обычно поставляют и хранят в оплетенных бутылях, бидонах или бочках. На более крупные станции жидкие реагенты доставляют в авто- или железнодорожных цистернах и с помощью компрессоров или насосов или самотеком переливают в резервуары-

хранилища, которые в отдельных случаях имеют защитные покрытия для предотвращения коррозионного воздействия реагентов.

В зависимости от свойств реагента резервуары-хранилища могут быть изготовлены из стали или бетона (с покрытием или без него), а также из некоторых полимерных материалов.

Их обычно устанавливают над бетонным приямком с защитным покрытием вместимостью, по меньшей мере, равной объему резервуара.

Резервуары-хранилища оборудуют различными самопишущими указателями уровня: от поплавка и рычага с указателем, движущимся по градуированной шкале, до устройств, описанных на с. 572, которые передают показания для дистанционного считывания.

18.2.3. ХРАНЕНИЕ ГАЗООБРАЗНЫХ РЕАГЕНТОВ

Газообразные реагенты, используемые в очистке воды (хлор, сернистый ангидрид, аммиак), сжижают и хранят в стальных баллонах или резервуарах. Емкости со сжиженными газами располагают в специальных помещениях, которые оборудуют в соответствии с действующими правилами.

Во Франции установлены строгие правила хранения хлора. Циркуляр 1972 г. содержит инструкции по хранению хлора в стационарных резервуарах-хранилищах. Циркуляр 1977 г. устанавливает аналогичные правила для передвижных сосудов (контейнеров, заполняемых на предприятиях-изготовителях).

Эти инструкции регламентируют расстояние от жилых районов, на котором должны находиться склады, а также специальные методы нейтрализации хлора в зависимости от размеров склада и формы, в которой подается хлор (газообразный или сжиженный).

Если при хранении хлора требуется нейтрализовать его утечку, то воздух, содержащий хлор и подлежащий нейтрализации, с помощью вентилятора подают в нижнюю часть поглотительной колонны, в которой встречный поток нейтрализующего раствора (раствор соды или соды с гипосульфитом натрия) орошает контактную насадку из колец.

Любая утечка хлора очень опасна, поэтому все помещения склада должны быть оборудованы надежными детекторами утечки.

Начавшаяся утечка газообразного хлора из резервуара-хранилища продолжается при условии, если извне через стенки резервуара передается количество тепла, достаточное для поддержания теплоты парообразования жидкого хлора при данном расходе.

Следует отметить, что при утечке сжиженный газ расширяется, его температура падает и это приводит к снижению утечки. По

этим причинам резервуары для хранения хлора нельзя орошать или погружать в воду за исключением случаев применения небольших баллонов, когда отсутствуют установки для нейтрализации утечек хлора; если отказал клапан баллона, единственное решение состоит в том, что баллон погружают в нейтрализующий раствор (соды или соды с гипосульфитом натрия).

18.3. ПРИГОТОВЛЕНИЕ РАСТВОРОВ И СУСПЕНЗИЙ

В некоторых случаях, например при регенерации ионнообменных смол или приготовлении активной кремнекислоты, реагенты (серную или соляную кислоту, растворы соды, силикат натрия) дозируют без разбавления, а затем разбавляют до требуемой концентрации. В других случаях реагенты применяют в виде разбавленных растворов или суспензий, приготовленных из концентрированных растворов или твердых продуктов.

Приготовление разбавленных растворов из концентрированных. Концентрированный раствор (рис. 18.2) из резервуара-хранилища *1* насосом *3* перекачивается в мерник *2*. Мерник может иметь или указатель уровня, который автоматически останавливает насос, когда достигается заданный уровень, или регулируемый перелив *4*, который возвращает концентрированный раствор в резервуар-хранилище. Концентрированный раствор из мерника сливается в бак *5*, где разбавляется до требуемой концентрации. Разбавление может сопровождаться перемешиванием с помощью мешалки *6*.

Приготовление разбавленных растворов из твердых реагентов. Если реагент поставляется в виде крупных гранул, растворяющихся с относительно небольшой скоростью, применяют аппарат, показанный на рис. 18.3. Реагент помещается в перфорированную корзину, погруженную в бак *1*, и постепенно растворяется в воде. С помощью мешалки *2* получается однородный раствор. На больших водоочистных станциях механическое перемешивание иногда заменяют перемешиванием сжатым воздухом. Процесс растворения может быть ускорен с помощью насоса, который обеспечивает рециркуляцию раствора со дна резервуара

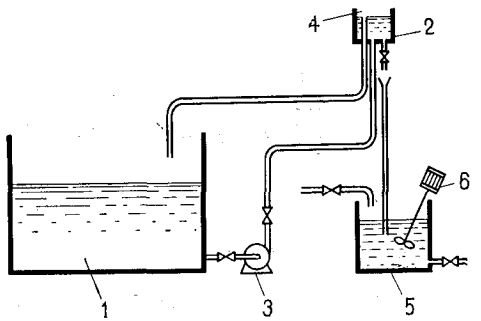


Рис. 18.2. Схема приготовления разбавленных растворов из концентрированных растворов

1 — резервуар для хранения концентрированного раствора; *2* — мерный бак; *3* — насос; *4* — подвижной перелив; *5* — бак для разбавленного раствора; *6* — мешалка

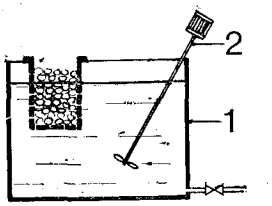


Рис. 18.3. Приготовление разбавленных растворов из твердых реагентов

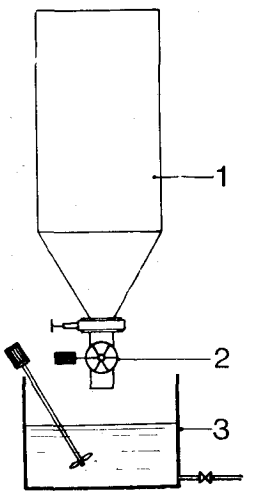


Рис. 18.4. Приготовление разбавленных растворов из твердых реагентов при сухом хранении

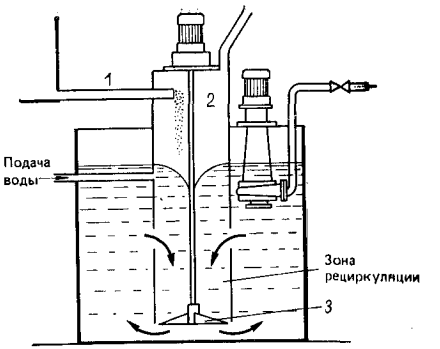


Рис. 18.5. Смеситель для приготовления растворов и суспензий

к корзине. На малых водоочистных станция хорошо растворимые реагенты обычно за гружают в бак непосредственно из мешко

Другая схема приготовления раствор показана на рис. 18.4. Реагент из бункера хранилища *1* питателем *2* с вращающейс крыльчаткой подается в растворный бак

Приготовление суспензий. Оборудовани применяемое для приготовления суспензи во многом сходно с описанным выше. Ре гент поддерживается во взвешенном состо нии при медленном перемешивании в ра творном баке, оборудованном перегородка ми для предотвращения образования вор нок. Этот метод используется для приготов ления известкового молока из гашеной и вести.

Время, необходимое для гашения негa шеной извести и приготовления суспензи зависит от заданной концентрации. Напр мер, для гашения быстрогасящейся извести при концентраци 25% требуется 1,5—2 мин, а при концентрации 10—15% - 15—20 мин.

По этой причине лучше гасить известь при 20—25%-ной ко центрации (при температуре смеси около 70 °С) и затем разба лять до требуемой концентрации.

Смеситель для приготовления растворов и суспензи (рис. 18.5) используют для растворения таких реагентов, ка сульфат алюминия, бикарбонат натрия и полиэлектролиты, также приготовления суспензий порошкообразного активно угля и извести.

С помощью шнекового питателя реагент подается по каналу *1* в резервуар *2* и засасывается на дно турбинкой *3*, работающей под разряжением. Снижение давления, обусловленное всасыванием, предотвращает распыление реагента при падении его в раствор, особенно когда используется активный уголь. Циркуляция большого количества воды в резервуаре обеспечивает тщательное перемешивание и скорость потока, достаточную, чтобы избежать выпадения осадка. Раствор или суспензия подается самотеком, насосом-дозатором или погружным насосом.

18.4. ДОЗИРОВАНИЕ РЕАГЕНТОВ

18.4.1. ПОДАЧА РАСТВОРОВ И СУСПЕНЗИЙ

18.4.1.1. Дозирование поршневыми насосами-дозаторами. Подача реагентов насосами-дозаторами регулируется изменением длины хода поршня или числа ходов (рабочих циклов).

По конструкции поршня насосы-дозаторы подразделяют на плунжерные и диафрагмовые (с механическим и гидравлическим приводом). Насосы-дозаторы характеризуются подаваемым расходом, максимальным рабочим давлением, точностью дозирования, типом гидравлической системы (плунжерный или диафрагмовый питатель), видом материала, из которого изготовлен питатель. Несколько таких насосов, смонтированных в многокамерной установке, могут перекачивать несколько жидкостей в пропорциональных количествах.

Поршневой насос-дозатор обеспечивает очень точное дозирование, но требует мер предосторожности при дозировании абразивных или особенно коррозионных реагентов (силиката натрия, хлорида железа). В зависимости от типа насоса (диаметр поршня, характеристика насоса и число ходов поршня) подача может изменяться от нескольких десятых миллилитра до нескольких тысяч литров в час.

Насосы-дозаторы со сдвоенной диафрагмой менее точны в работе, чем плунжерные насосы, и их подача редко превышает 20 л/ч.

Диафрагмовые насосы-дозаторы с гидравлическим приводом отличаются очень точным дозированием, но все же несколько уступают плунжерным насосам. Их используют для коррозионных, токсичных, абразивных, загрязненных или вязких жидкостей. Они могут иметь одинарную или двойную диафрагму. Подача реагентов насосами этого типа может достигать 2500 л/ч при высоком давлении.

Сильфонные насосы-дозаторы, являющиеся разновидностью поршневых насосов, изготовляют из химически инертных материалов. Поскольку в них отсутствуют какие-либо уплотнения или прокладки, эти насосы можно использовать для подачи растворителей, сжиженных газов или высококоррозионных веществ.

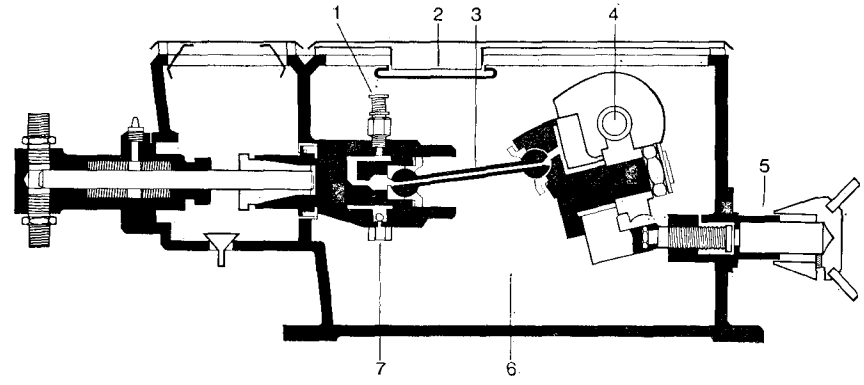


Рис. 18.6. Схема поршневого насоса-дозатора MILROYAL

1 — предохранительный клапан контура смазки; *2* — гибкая мембрана (демпфер); *3* — смазываемый привод; *4* — червячный приводной вал; *5* — микрометрическая регулировка длины хода поршня; *6* — смазка; *7* — магнитный фильтр

Точность дозирования достаточно высокая, максимальная подача может достигать 1500 л/ч. Давление нагнетания невелико (обычно ниже 0,5 МПа).

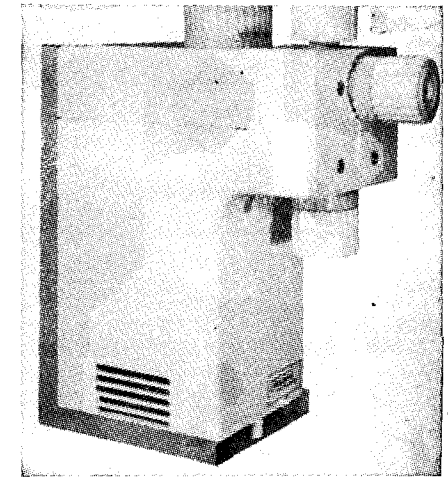


Рис. 18.7. Насосы со сдвоенной диафрагмой типов М 18, М 28 и М 38

Многокамерные агрегаты. В некоторых случаях один двигатель может обслуживать несколько насосов (от 2 до 6). При этом можно установить определенное соотношение между подачей реагентов насосами, входящими в установку. Это имеет большое значение, особенно при получении активной кремнекислоты, когда необходимо поддерживать точное соотношение между расходами двух дозируемых реагентов.

Установка для дозирования реагентов. Насосы-дозаторы устанавливают на резервуарах-хранилищах или растворных баках, которые могут быть оборудованы лопастными мешалками или уровнемерами. Система насос — бак составляет, таким образом, моноблок дозирующей установки, в состав которой также входит электрошкаф.

На рис. 18.11 показана установка такого типа. Насос-дозатор *1* расположен над баком и всасывает раствор через трубу-успокоитель *4*, которая имеет диаметр в 2 раза больший, чем диаметр

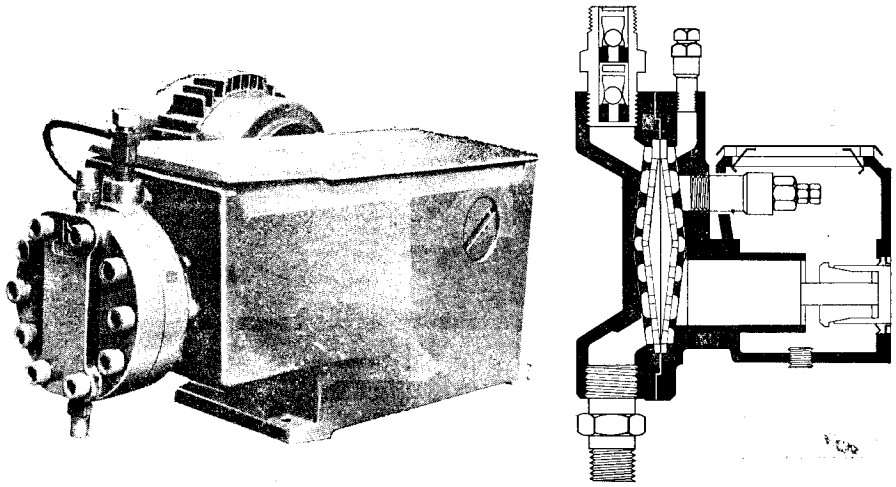


Рис. 18.8. Насос—дозатор типа MILROYAL с диафрагмой

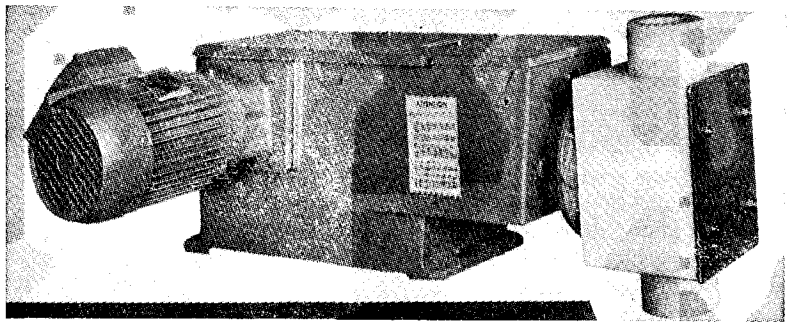


Рис. 18.9. Насос типа MILROYAL с полиэтиленовым сильфонным дозатором

всасывающей трубы. Датчик уровня *6* останавливает насос при понижении уровня.

18.4.1.2. Гравитационные дозаторы

DRC дозаторы предназначены для подачи малых и средних расходов растворов реагентов. Принцип их работы очень прост: приемное устройство, через которое с поверхности забирается раствор, опускается в бак с заданной скоростью.

На рис. 18.12 показан дозатор *DRC1,* действующий по принципу электрических часов. Регулировка по времени обеспечивается синхронным двигателем; спускной механизм управляет снижением уровня раствора в приемном устройстве при скорости, которую можно регулировать изменением числа зубьев спускного механизма.

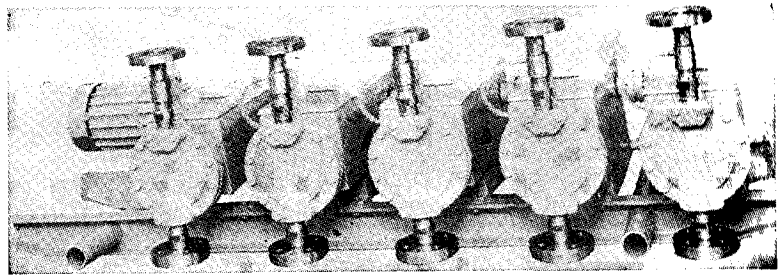


Рис. 18.10. Диафрагмовый насос-дозатор типа MILROYAL с пятью нагнетательными фланцами

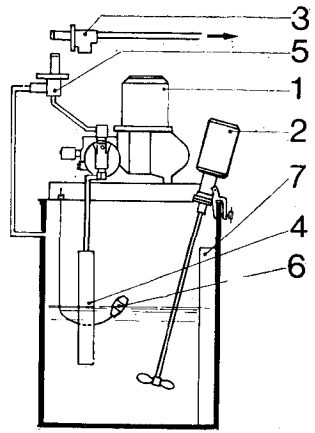


Рис. 18.11. Схема установки для дозирования реагентов

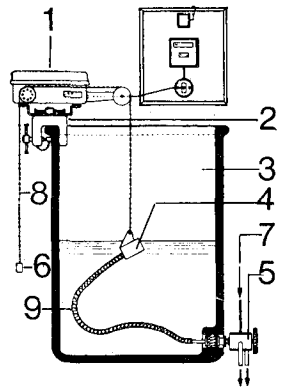


Рис. 18.12. Схема дозатора типа DRC 1

1 — распределительное устройство DRC1; *2* — крепление распределительного устройства; *3* — бак раствора реагента; *4* — приемное устройство; *5* — трехходовой клапан; *6* — противовес; *7* — отверстие для впуска воздуха; *8* — цепь из нержавеющей стали; *9* — гибкий шланг

В дозаторе DRC 4 электродвигатель заменен заводным часовым механизмом, поэтому модель может быть использована для обеспечения постоянного расхода раствора, когда отсутствует электроснабжение.

Шайбовые дозаторы могут использоваться для дозирования как растворов, так и суспензий. Они предназначены для подачи постоянного расхода (реагента) или расхода, пропорционального расходу обрабатываемой воды.

Дозатор С 110 представляет собой насос, производительность которого больше требуемого расхода раствора. Насос подает раствор или суспензию по трубе *1* в отделение *2*, где поддерживается постоянный уровень с помощью водослива *3*, переливаясь через который раствор или суспензия возвращается в растворный бак по трубе *4* (рис. 18.13).

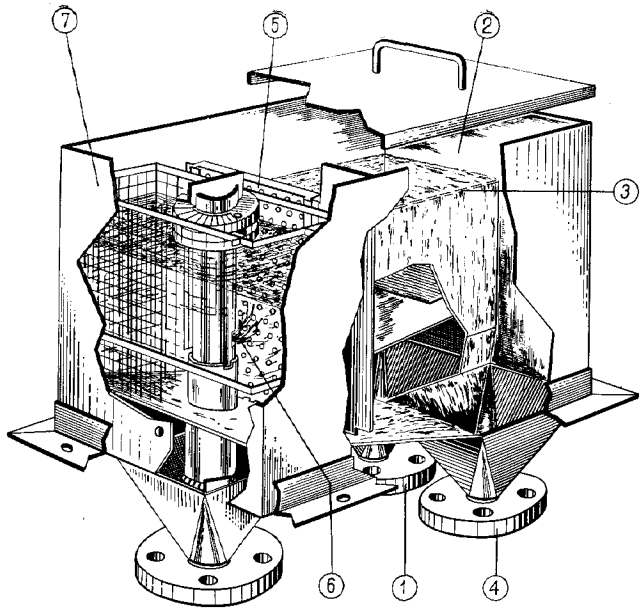


Рис. 18.13 Схема дозатора модели С 110

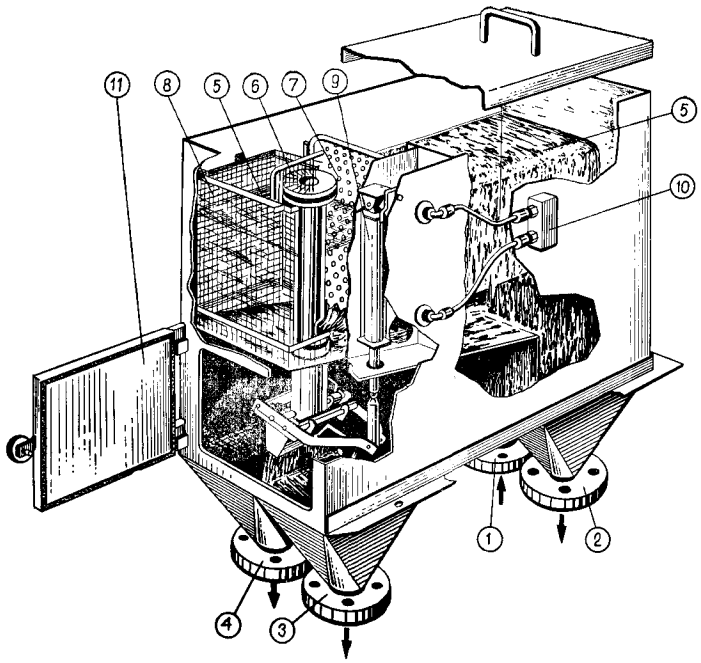


Рис. 18.14. Схема дозатора Р 106:

1 — подача дозируемого раствора; *2* — перелив в растворный бак; *3* — подача дозируемого раствора в воду; *4* — возврат жидкости в растворный бак; *5* — приемное отделение для дозируемой жидкости; *6* — питатель с регулируемой шайбой; *7* — успокоительная перфорированная перегородка; *8* — защитная сетка; *9* — дифференциал; *10* — вход рабочей жидкости; *11* — вибрирующая воронка

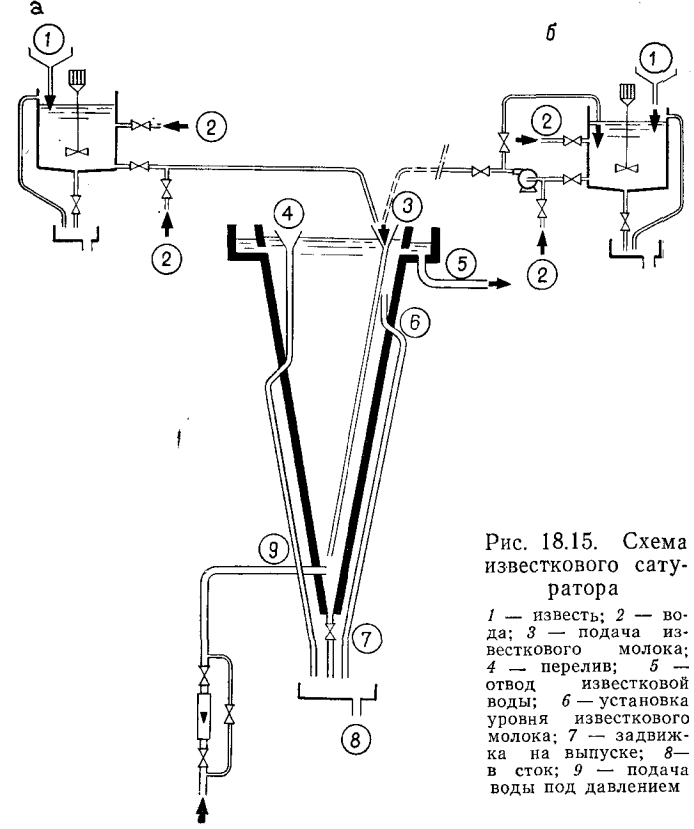


Рис. 18.15. Схема известкового сатуратора

1 — известь; *2* — вода; *3* — подача известкового молока; *4* — перелив; *5* — отвод известковой воды; *6* — установка уровня известкового молока; *7* — задвижка на выпуске; *8* — в сток; *9* — подача воды под давлением

Раствор реагента проходит через перфорированную успокоительную перегородку *5* и дозируется через калиброванную шайбу *6* с регулируемым сечением, которая защищена от засорения сеткой *7*.

Дозатор Р 106 (рис. 18.14) основан на том же принципе, что и дозатор С 110. Он подает реагент пропорционально расходу обрабатываемой воды. В этом случае реагент, проходящий через калиброванную шайбу, не попадает непосредственно в обрабатываемую воду, а стекает вниз в вибрирующую воронку *11*, которая приводится в действие дифференциалом. В соответствии с импульсами, вырабатываемыми пропорциональным регулятором «Хроноконтакт 402» (см. с. 567), реагент подается или в обрабатываемую воду по трубе *3*, или возвращается в растворный бак по трубе *4*.

18.4.1.3. Дозаторы вытеснительного типа пригодны для плохо растворимых реагентов, таких как сернокислый глинозем, плавленый карбонат натрия, некоторые полифосфаты и т. д.

Эти дозаторы не очень точны, так как концентрация раствора может меняться в зависимости от количества реагента, оставлен-

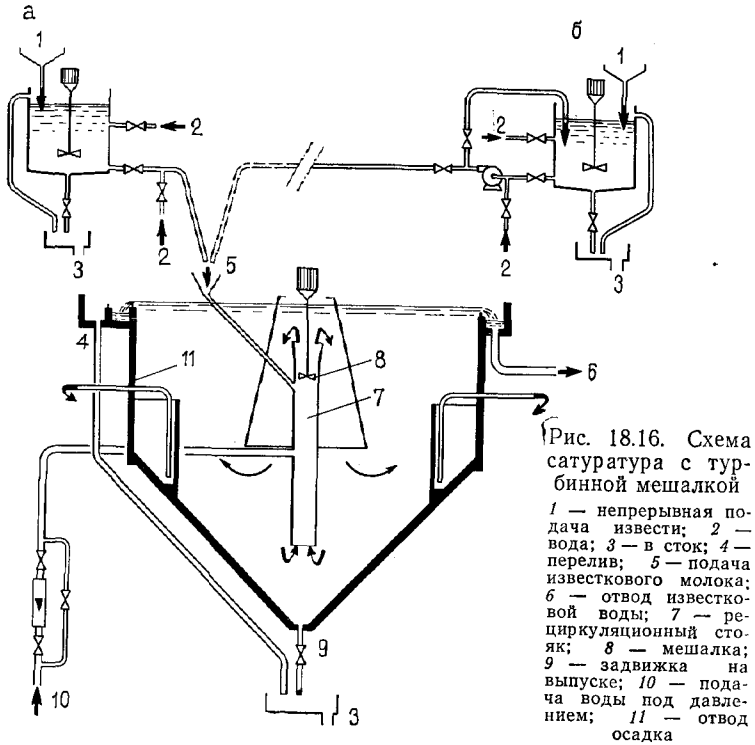


Рис. 18.16. Схема сатуратура с турбинной мешалкой

1 — непрерывная подача извести; *2* — вода; *3* — в сток; *4* — перелив; *5* — подача известкового молока; *6* — отвод известковой воды; *7* — рециркуляционный стояк; *8* — мешалка; *9* — задвижка на выпуске; *10* — подача воды под давлением; *11* — отвод осадка

ного в баке. Они не могут применяться для хорошо растворимых реагентов, таких как сульфат алюминия.

Сатуратор — аппарат, используемый для приготовления и дозирования насыщенных растворов извести (известковой воды).

Статический сатуратор. В этом аппарате воду пропускают через загрузку извести со скоростью, обеспечивающей продолжительность контакта, которая вполне достаточна, чтобы получить насыщенный раствор. Известковое молоко приготовляют периодически. Оно подается самотеком *а* или с помощью насоса *б* в нижнюю часть сатуратора по трубе *3* после того, как уровень в сатураторе понизится и карбонатный осадок и загрязнения будут удалены через дренажную задвижку *7*. Аппарат полностью перезагружается известковым молоком через каждые 24 ч.

Вода для получения насыщенного раствора подается в нижнюю часть аппарата *9*, ее расход регулируется ротаметром, известковая вода отводится по трубе *5*.

Производительность сатуратура 1—1,2 кг CaO в час в виде известковой воды с 1 м² полезной площади верхнего сечения (1,3—1,6 кг/(ч·м²) $Ca(OH)_2$).

Турбинный сатуратор (рис. 18.16) позволяет получить бо́льшие расходы известковой воды с той же площади, чем статический сатуратор, т. е. 2,5—3 кг/(ч·м²) CaO или 3,2—4 кг/(ч·м²) $Ca(OH)_2$.

Известковое молоко приготовляют непрерывно или периодически, но его подача должна производиться непрерывно. Известковое молоко подается самотеком *а* или с помощью насосов *б* в рециркуляционный стояк по трубе *5*. Рециркуляция вызывается лопастной мешалкой *8*, расположенной в верхней части рециркуляционного стояка, в который также поступает вода; вода, известковое молоко и карбонатный осадок тщательно перемешиваются. Установка работает как осветлитель со слоем взвешенного осадка; уровень взвешенного слоя регулируется водосливами уплотнителей, в которые поступает образовавшийся осадок.

Осадок обычно удаляется через трубу *11* и, в исключительных условиях (тяжелый осадок), через дренажную задвижку *9*. Известковая вода отводится через трубу *6*. При использовании хлорида железа в качестве коагулянта с помощью этого сатуратора можно получить даже бо́льшие расходы известковой воды— до 5—6 кг CaO/ч на 1 м² полезной площади сооружения.

Сатураторы применяют также для получения известкового молока с целью последующего получения известковой воды.

18.4.2. ИЗМЕРЕНИЕ И ДОЗИРОВАНИЕ СУХИХ РЕАГЕНТОВ В ПОРОШКООБРАЗНОМ ВИДЕ

Сухие порошкообразные реагенты дозируют с помощью объемных или гравиметрических устройств. Тип дозатора следует выбирать с учетом требуемой точности дозирования, вида дозируемого реагента и заданного диапазона изменения расходов.

Очень важно помнить, что изготовители обычно указывают диапазон расхода реагентов дозаторами в единицах объема, а не массы, и что установление правильного соотношения между объемом и массой зависит от многих факторов (например, степени уплотнения реагента). К неточности пересчета добавляется еще неточность работы самого дозатора.

Иногда возникает несоответствие между точностью дозирования и постоянством дозировки. Дозатор с точностью ±3% дозируемого объема по всей шкале может быть отнесен к классу очень точных аппаратов.

18.4.2.1. Объемные дозаторы

Дозаторы с вращающейся крыльчаткой используют на водоочистных станциях, где не требуется высокая точность дозирования. Крыльчатка управляется часовым механизмом или регулируемым двигателем. Расход изменяется от 50 до 1000 л/ч.

Дозатор с вращающимся диском. В нижней части загрузочной воронки, которая в зависимости от типа реагента может и не иметь вибратора для предупреждения слеживания реагента, установлен диск, вращающийся с постоянной скоростью. Расположенный под регулируемым углом скребок над диском откло-

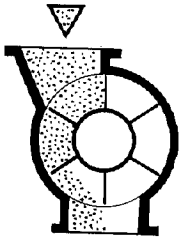


Рис. 18.17. Дозатор с вращающейся крыльчаткой

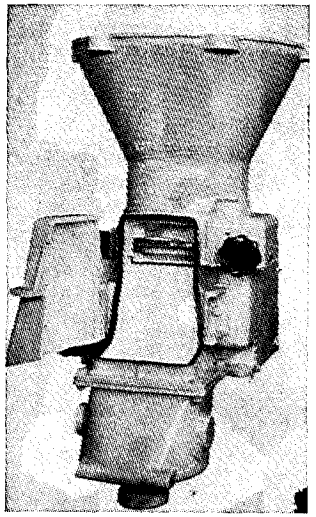


Рис. 18.18. Дозатор с вращающимся диском

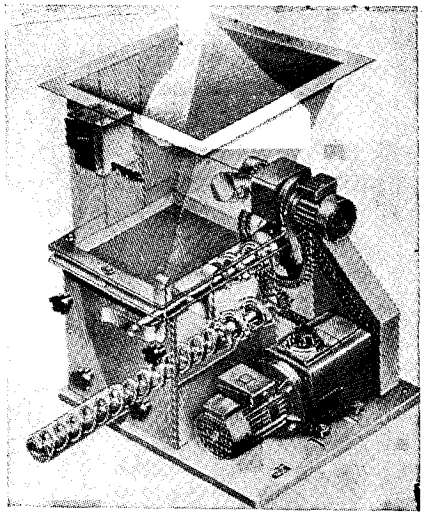


Рис. 18.19. Дозатор вытеснительного типа для порошкообразных реагентов. Тип DP 350

няет реагенты при заданной скорости. Реагент поступает с постоянным расходом или в вихревую камеру под желобом, где он захватывается водой, или в бак, иногда оборудованный мешалкой, где образуется суспензия или раствор.

Дозаторы этого типа более точны, чем дозаторы с вращающейся крыльчаткой. Они предназначены для дозирования (при расходе 10—1000 л/ч) стандартных реагентов, таких как сульфат алюминия, известь, карбонаты кальция или натрия.

Расход изменяется с помощью головки с насечкой, которая регулирует угол среза скребка; двигатель вращается с постоянной скоростью и работает непрерывно или периодически. Вместо него может быть установлен двигатель с регулируемой скоростью вращения.

Шнековый дозатор может применяться для дозирования с приемлемой точностью большинства порошкообразных реагентов (включая очень тонкие порошки) при условии, что вместимость бункера и тип питателя точно определены.

Дозатор состоит из загрузочной воронки и дозирующего шнека со скребком, который транспортирует дозируемый реагент через калиброванную трубу. Реагент уже гомогенизирован с помощью лопастной мешалки с горизонтальной осью, которая одновременно предотвращает образование мертвой зоны на входе в дозирующий шнек.

Расход изменяют или непосредственным регулированием механического вариатора скорости, который управляет скоростью вращения дозирующего шнека, или используя регулируемый двигатель, скорость которого контролируется расходом обрабатываемой воды. В последнем случае управление двигателем может осуществляться по соотношению скорости вращения и заданной часовой дозы реагента.

Питающая воронка может быть снабжена вибратором с регулируемой частотой или амплитудой.

Расход шнекового дозатора изменяется от нескольких литров до нескольких кубических метров в час.

Стандартный цех для хранения и объемного дозирования реагентов. На рис. 18.20 показан цех для хранения и дозирования порошкообразного активного угля. Реагент выгружается с помощью пневматической системы из грузовой машины и подается в верхнюю часть бункера. Активный уголь отделяется от воздуха в циклоне. Воздух перед выпуском в атмосферу фильтруется и увлажняется.

В коническую часть бункера-хранилища периодически подается сухой воздух для того, чтобы привести реагент в псевдожидкое состояние, обеспечить его свободное движение и поддерживать кажущуюся плотность реагента насколько возможно постоянной. Реагент подается дозатором шнекового типа, который снабжен вращающейся крыльчаткой, управляемой от верхнего и нижнего уровней бункера. Активный уголь затем попадает в рециркуляционный насадок смесителя, работающий при давлении, немного меньше атмосферного; дозирующий насос или погружной насос подает суспензию в точку ввода.

18.4.2.2. Гравиметрические дозаторы. Точность сухих дозаторов для дозирования порошкообразных реагентов может быть увеличена использованием гравиметрических питателей, в которых порошок непрерывно взвешивается. Разница показаний между измеренным и заданным значениями передается на распределитель, действие которого сводится к уничтожению этой разницы. Поэтому изменение плотности дозируемого порошка не влияет на точность дозирования, и расход может регулироваться с большой точностью, обычно превышающей точность, требуемую при очистке воды и, как правило, обеспечиваемую применением объемных дозаторов.

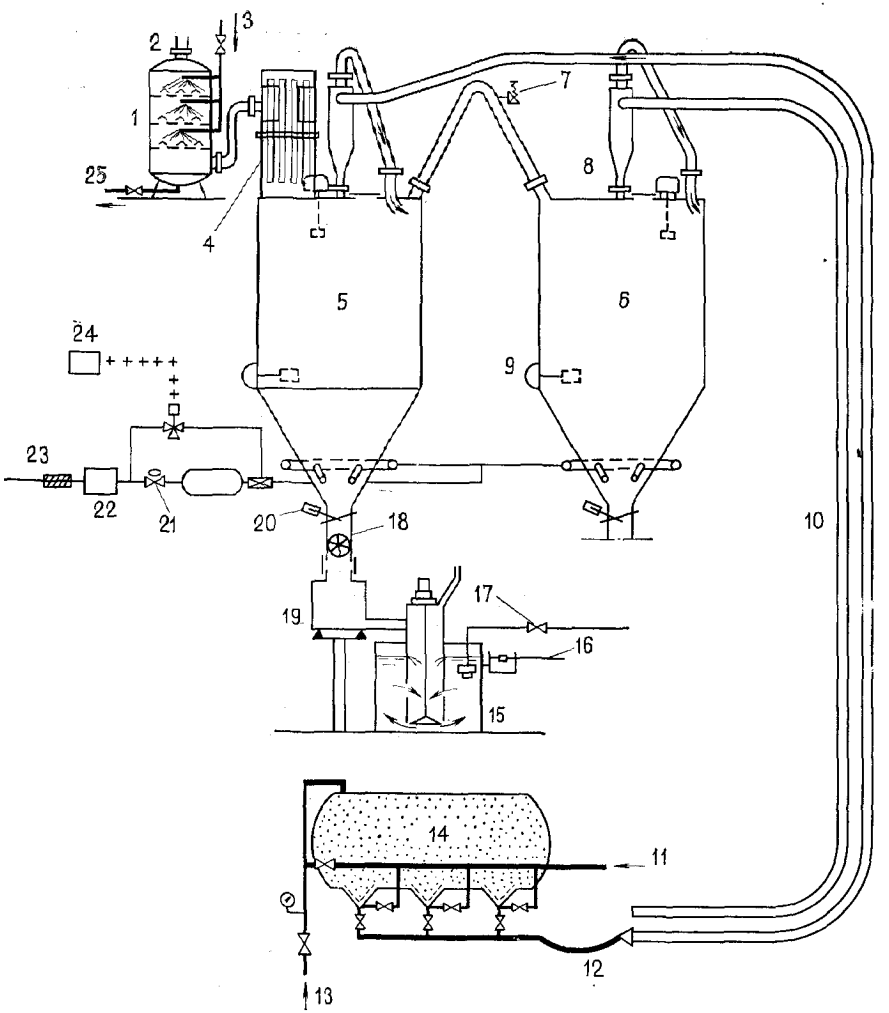


Рис. 18.20. Типовой реагентный цех с дозаторами

1 — мокрый фильтр для очистки воздуха; *2* — воздушный стояк; *3* — вода под давлением для разбрызгивания; *4* — воздушный рукавный фильтр; *5* — бункер 1; *6* — бункер 2; *7* — предохранительный клапан; *8* — циклон; *9* — датчик нижнего уровня; *10* — подающие трубы; *11* — воздух от компрессора на автомобиле; *12* — гибкое соединение с цеховыми трубопроводами; *13* — запасная подача воздуха из цеха; *14* — автоцистерна; *15* — смеситель; *16* — бак постоянного уровня; *17* — воздушник; *18* — крыльчатка; *19* — шнековый дозатор; *20* — отсекающий клапан; *21* — расширительный клапан; *22* — осушитель воздуха; *23* — фильтр; *24* — контактный часовой механизм; *25* — в сток

Дозаторы потери веса (модель «Дегремон») предназначены для распределения точного часового расхода реагента путем последовательного наполнения взвешивающей воронки, которая периодически опорожняется в смеситель. Это тип дозатора очень широко используется; он пригоден для всего диапазона расходов реагентов на водоочистных станциях. На рис. 18.21 показана

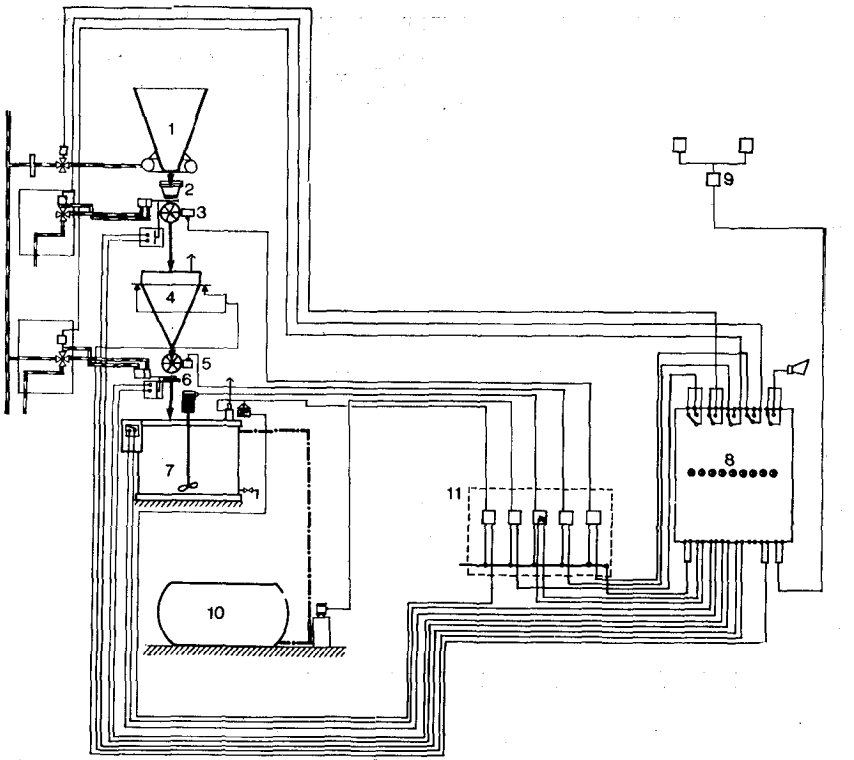


Рис. 18.21. Принципиальная схема подачи и дозирования порошкообразного угля

1 — бункер с активным углем; *2* — отсекающий клапан; *3* — крыльчатка для заполнения воронки; *4* — взвешивающая воронка; *5* — крыльчатка для опорожнения воронки; *6* — отсекающий клапан; *7* — смеситель; *8* — шкаф управления; *9* — аналоговая ЭВМ; *10* — емкость для кислоты; *11* — электрошкаф

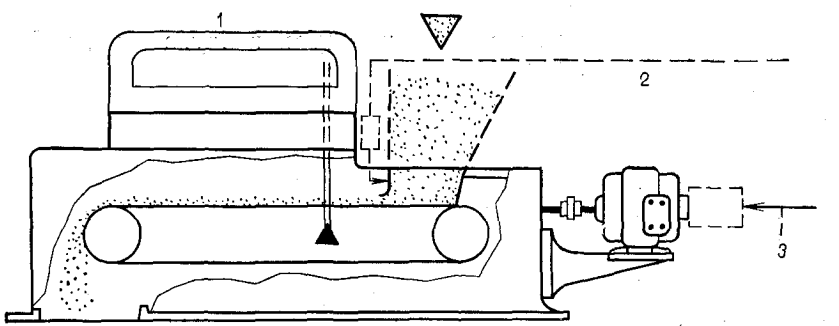


Рис. 18.22. Ленточный питатель с устройством или без него для взвешивания и контроля

1 — взвешивающее устройство; *2* — с автоматическим регулированием сигнала от дозы (путем изменения толщины слоя); *3* — без сигнала, от расхода воды (путем изменения скорости ленты)

установка для дозирования активного угля. Шкаф управления *8* подает определенный ряд импульсов, вызывающих циклы заполнения и опорожнения воронки *4*. Данные о расходе обрабатываемой воды и дозе реагента вводят в ЭВМ (9), которая перемножает их и через шкаф управления устанавливает массу реагента, которая должна быть дозирована. Наполнять взвешивающую воронку нужно очень быстро (тогда как опорожнение — длительный процесс), чтобы концентрация в смесителе *7* была постоянной.

Ленточный дозатор состоит из ленты, на которую реагент поступает из воронки; скорость движения ленты, обычно регулируемая расходом обрабатываемой воды, переменна. В зависимости от требуемой степени очистки воды толщина слоя реагента изменяется путем установки перегородки с регулируемой высотой. Взвешивающее устройство, расположенное под лентой, контролирует, соответствует ли масса реагента произведению расхода обрабатываемой воды и указанной дозы реагента. Если имеется отклонение, масса слоя автоматически корректируется.

Этот дозатор можно применять не для всех реагентов; например, им нельзя дозировать активный уголь, так как он не обеспечен уплотнением против пыления. Вообще этот дозатор сложен в эксплуатации.

18.4.3. ДОЗИРОВАНИЕ ГАЗООБРАЗНЫХ РЕАГЕНТОВ

Конструкции устройств для дозирования различных газов, используемых в качестве реагентов при очистке воды, в основном одинаковы. Так как наиболее часто в технологии очистки воды применяют газообразный хлор, весь следующий раздел посвящен дозированию хлора.

18.4.3.1. Подача хлора к дозирующему оборудованию. Предприятия химической промышленности поставляют хлор в сжиженном виде в металлических емкостях. Давление в емкостях изменяется в зависимости от температуры воздуха (см. с. 923).

Емкость представляет собой баллон, имеющий в верхней части клапан, через который газообразный хлор выходит под давлением, определяемым температурой сжиженного хлора. Когда газ отводится, часть сжиженного хлора испаряется и температура оставшегося сжиженного хлора снижается. Это падение температуры должно быть компенсировано внешним теплом, что при большом съеме хлора может обусловить необходимость искусственного подогрева баллона.

Подогревать емкости со сжиженным хлором довольно опасно; нельзя допускать слишком большого нагрева. Поэтому при использовании больших объемов хлора применяют горизонтальные баллоны, часто называемые тэнками, а во французских инструкциях — передвижными контейнерами, в отличие от стационарных. Баллон, показанный на рис. 18.24, оборудован двумя задвижка-

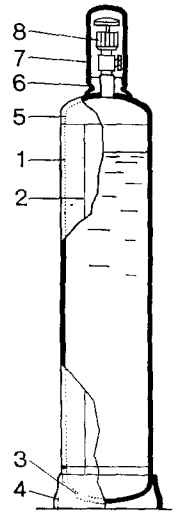


Рис. 18.23. Разрез сварного баллона

1 — корпус баллона; *2* — сварной шов; *3* — нижний тарельчатый конец; *4* — башмак; *5* — верхний тарельчатый конец; *6* — сварной патрубок; *7* — крышка клапана; *8* — клапан

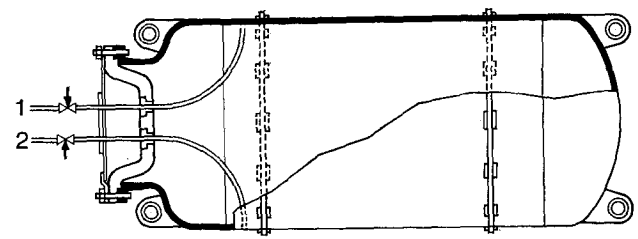


Рис. 18.24. Горизонтальный баллон с выпускными клапанами для хлора газообразного *1* и жидкого *2*

ми, что позволяет отводить либо газообразный, либо сжиженный хлор. Часть баллона, содержащая газ, используется, когда расход хлора незначителен и подогрев не требуется; когда нужен очень большой съем хлора, его забирают из части баллона, содержащего сжиженный газ, который проходит через очень узкое отделение, погруженное или в водяную ванну, или в ванну, искусственно подогреваемую, с термостатированием и действующую как испаритель.

Схема стандартной установки. На рис. 18.25 показан цех хранения и распределения хлора в сжиженном виде и дозирования его в газообразном виде.

Газовые зоны резервуаров *1* соединены выравнивающим давление контуром *3*, а зоны сжиженного хлора — подающим контуром *2*. Если запорные клапаны на резервуарах и испарителе закрыты, расширительный баллон в контуре предотвращает нарастание избыточного давления (расширяющийся сжиженный хлор может взорвать систему).

В испаритель *5* через нагревательный элемент *6* подается тепло, необходимое для испарения хлора. Равновесие достигается, когда объем испарившегося сжиженного хлора становится равным объему сжиженного хлора, поступающего в испаритель. Тогда уровень в баллоне-испарителе стабилизируется.

Газообразный хлор, выходящий из испарителя, проходит через каплеуловитель хлора *7*, редукционный клапан *10* и поступает в хлоратор *11*.

В случае нарастания избыточного давления в контуре газообразного хлора между испарителем и хлоратором разрывной диск *8* и предохранительный клапан *9* сбросят давление в поглотительную колонну *14*.

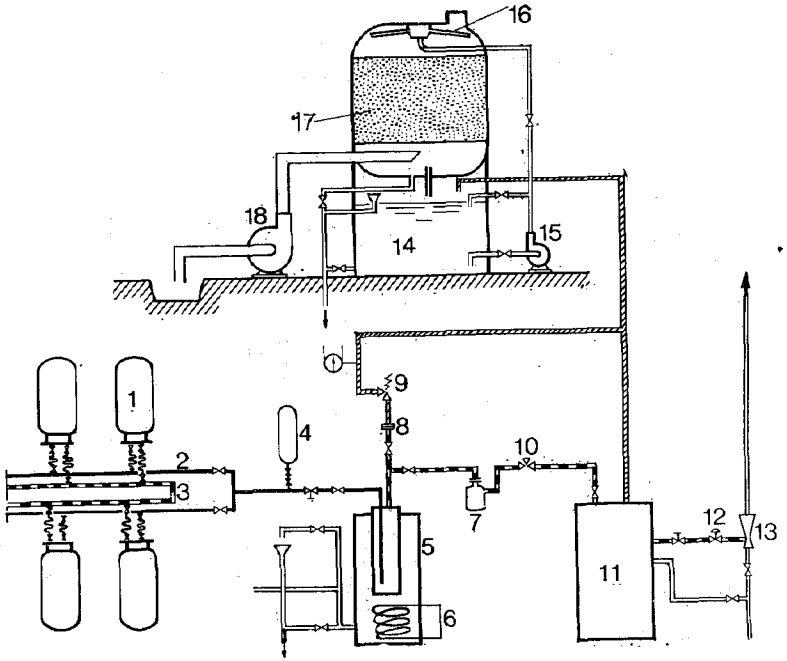


Рис. 18.25. Схема хранения и распределения жидкого хлора

1 — резервуары с хлором; *2* — контур сжиженного хлора; *3* — контур газообразного хлора; *4* — расширитель; *5* — испаритель; *6* — нагревательный элемент; *7* — каплеуловитель хлора; *8* — разрывной диск; *9* — предохранительный клапан; *10* — редукционный клапан; *11* — хлоратор; *12* — автоматическая запорная задвижка; *13* — всасывающий эжектор; *14* — поглотительная колонна; *15* — насос для перекачки нейтрализационного раствора; *16* — разбрызгивающая дырчатые трубы; *17* — контактная загрузка; *18* — вентилятор

Если в помещении, где находятся резервуары, или в помещении хлораторов возникают утечки хлора, детектор утечки включает сигнал тревоги и автоматически включает вентилятор *18*, который засасывает воздух с хлором из загазованных помещений, и также включает насос, который подает нейтрализационный раствор (сода, гипосульфит натрия). Воздух с хлором проходит через контактную насадку из колец *17* навстречу потоку нейтрализационного раствора, который разбрызгивается в верхней части поглотительной колонны через перфорированные трубы *16*.

18.4.3.2. Хлораторы, работающие под вакуумом. Вакуумное оборудование используют с целью автоматически прекратить подачу хлора, если прекращена подача воды для растворения хлора, либо предотвратить попадание хлора в атмосферу при утечке. Вакуум создается гидравлическим эжектором, который одновременно растворяет хлор в воде.

Компактный хлоратор особенно подходит для малых расходов хлора и может быть закреплен на верхней части баллона. Иногда его присоединяют к баллону с помощью короткой трубы. При

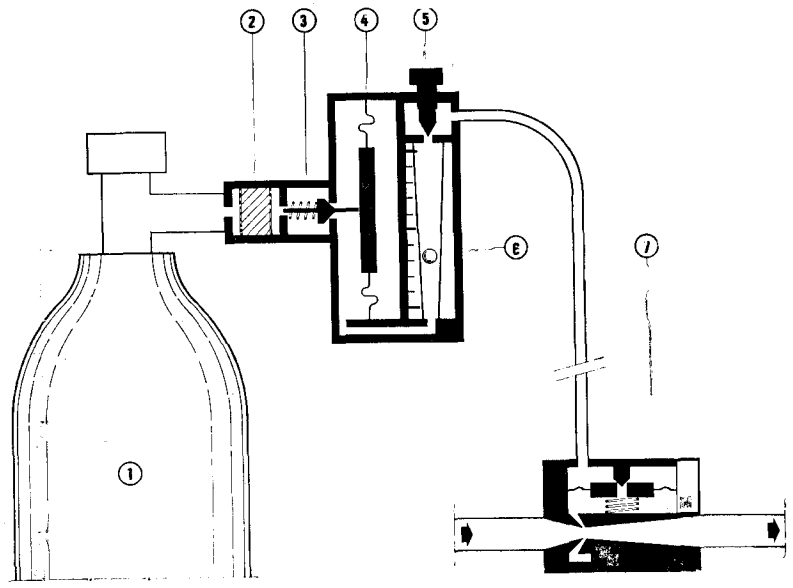


Рис. 18.26. Принципиальная схема компактного хлоратора

1 — баллон с хлором; *2* — фильтр; *3* — впускной клапан; *4* — регулировочная диафрагма; *5* — ручка управления; *6* — расходомер; *7* — гидроэжектор

этом длина коммуникаций сводится к минимуму и, таким образом, снижается риск утечек. С другой стороны, если хлоратор присоединен непосредственно к баллону, при работе должны быть приняты специальные меры предосторожности: чтобы не повредить хлоратор, его следует снимать каждый раз, когда меняют баллон.

Принцип этого устройства показан на рис. 18.26. Вакуум, создаваемый гидравлическим эжектором *7*, регулируется с помощью регулятора давления диафрагмового типа *4* по заданному расходу хлора; этот расход, в свою очередь, регулируется ручкой управления *5* и контролируется расходомером *6*. В некоторых устройствах регулятор состоит из двух мембранных редукционных клапанов, работающих последовательно. В зависимости от создаваемого вакуума диафрагма регулятора двигается и вытесняет иглу впускного клапана *3*.

Когда устройство прекращает работу, обратный клапан, входящий в состав эжектора, предотвращает попадание воды в хлоратор. В случае разрушения или утечки в трубе, соединяющей эжектор с дозирующим оборудованием, вакуум выше диафрагмы регулятора давления нарушается, а впускной клапан хлора закрывается.

Большинство моделей компактного хлоратора усовершенствовано:

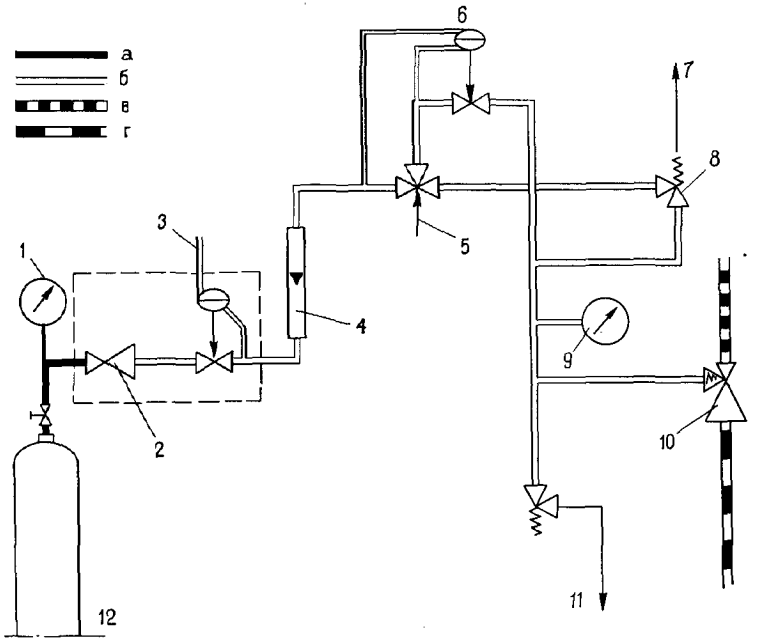


Рис. 18.27. Схема высокопроизводительного хлоратора

1 — манометр; *2* — расширительный клапан; *3* — атмосферное давление; *4* — расходомер; *5* — регулирующий клапан; *6* — вакуумный регулирующий клапан; *7* — воздушный канал; *8* — клапан срыва вакуума; *9* — манометр; *10* — гидравлический эжектор; *11* — дренаж; *12* — баллон с хлором

Условные обозначения: *а* — хлор под давлением; *б* — хлор под вакуумом; *в* — хлорная вода; *г* — рабочая вода

на пульте управления смонтированы дистанционная установка узла расходомера хлора и ручки управления, тогда как баллон с хлором и остальные части хлоратора (впускной клапан и регулятор давления) расположены в помещении станции или снаружи;

обеспечено автоматическое переключение с одного баллона на другой при опорожнении баллона;

имеются указатели «баллон пустой» или «хлора мало».

Описанный компактный хлоратор применяется для расходов хлора от 5 до 3000—4000 г/ч.

Высокопроизводительные хлораторы работают под фиксированным вакуумом.

На рис. 18.27 показана схема устройства такого хлоратора: вакуум, создаваемый гидравлическим эжектором *10*, регулируется вакуумным клапаном *6*, который обеспечивает поддержание постоянного вакуума. Засасываемый хлор проходит через расширительный клапан *2*, расходомер *4* и регулирующий клапан *5*. В хлораторе этого типа расход регулируется клапаном *5* с электрическим или пневматическим управлением, что обеспечивает возможность полного дистанционного управления.

18.4.4. РЕГУЛИРОВАНИЕ РАСХОДА РЕАГЕНТА ПО РАСХОДУ ВОДЫ И ЗНАЧЕНИЮ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКОГО ПАРАМЕТРА

Для этой цели используют две системы. Первая и простейшая работает следующим образом. Расходомер на подающей трубе станции испускает импульсы каждый раз, когда проходит установленный объем воды. Эти импульсы (частота их зависит от расхода воды) принимаются «Хроноконтактом Е 402» (рис. 18.28), который преобразует каждый импульс в сигнал определенной продолжительности. Цикл работы дозатора зависит от продолжительности сигнала.

Дозатор работает следующим образом. Включается двигатель насоса-дозатора. Бункер на питателе Р 106 переводится в положение дозирования; в случае хлорирования воды открывается клапан на расширительном контуре хлора или на контуре эжектора.

Второй, более сложный, и поэтому более дорогой метод включает непрерывное измерение расхода обрабатываемой воды и реагента или параметра, связанного известным соотношением с расходом, в сочетании с регулированием подачи реагента для поддержания постоянного соотношения между двумя расходами.

Таким образом, при использовании насоса-дозатора применяется регулируемый двигатель, а в качестве параметра, пропорционального расходу, принимается скорость вращения двигателя, измеренная тахогенератором. Скорость вращения двигателя регулируется с помощью электронного устройства таким образом, чтобы соотношение между сигналами расходомера и тахогенератора оставалось постоянным при изменении расхода обрабатываемой воды.

При хлорировании воды это соотношение поддерживается постоянным с помощью серводвигателя, который автоматически управляет регулирующим клапаном.

Дозирование по физико-химическому параметру. Основные принципы этого управления изложены в гл. 19. В большинстве случаев расход обрабатываемой воды меняется, и это обусловливает необходимость двойного управления: по расходу и по значению химического параметра, который должен поддерживаться постоянным. При условии, что дозатор снабжен двумя регуляторами расхода, очень простой метод регулирования состоит в том, чтобы регулировать одно из устройств по расходу и затем регулиро-

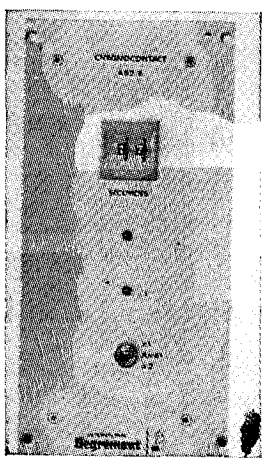


Рис. 18.28. Хроноконтакт Е 402

вать второе по разнице между заданным и измеренным значениями химического параметра.

Например, если расход известен из дозатора с вращающимся диском регулируется по значению pH изменяющегося расхода обрабатываемой воды, расход реагента можно регулировать по расходу воды или путем автоматического изменения с помощью «Хроноконтакта» длины интервала между двумя подачами реагента, или регулированием скорости диска, который в этом случае приводится во вращение регулируемым двигателем. Разница между значением pH воды и заданным значением pH используется в то же время и для корректировки расхода извести автоматическим регулированием положения скребка на вращающемся диске.

Таким образом, при использовании насоса-дозатора расход реагента регулируется по расходу обрабатываемой воды с помощью «Хроноконтакта», а результат этого пропорционального регулирования затем корректируется автоматическим регулятором расхода.

19. ИЗМЕРЕНИЯ, КОНТРОЛЬ, УПРАВЛЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

19.1. АВТОМАТИЧЕСКОЕ ИЗМЕРЕНИЕ И КОНТРОЛЬ ПРИ ОЧИСТКЕ ВОДЫ

19.1.1. ВВЕДЕНИЕ

Повышение сложности систем станций очистки воды (оснащаемых техническими средствами, сравнимыми с используемыми в химической технологии) и потребность в экономии постоянно уменьшающихся водных ресурсов приводят к необходимости осуществления непрерывного автоматического контроля процессов очистки, т. е. автоматическому измерению параметров: общих и характерных только для воды. К общим параметрам, которые требуется измерять, относятся, главным образом, расходы воды, уровни жидкости или осадков, давление и температура.

Для правильной эксплуатации станций водоподготовки питьевой или технической воды, весьма существенно знать расход поступающей воды. Количество получаемой очищенной воды меньше количества поступающей воды на величину потерь при водоподготовке. Определение потерь воды необходимо для того, чтобы научно обосновать сведение этих потерь к минимуму.

Физико-химическое воздействие реагентов, используемых при очистке воды, с диспергированными или растворенными в ней веществами обеспечивает требуемое количество очищенной воды.

Измерение расходов реагентов производится с целью согласования их с расходами очищаемой воды. Реагенты хранят или в жидком виде в емкостях, или в порошкообразном виде в бункерах. Автоматическое измерение уровней дает непрерывную информацию о том, как долго можно работать без новых поступлений реагентов, и позволяет более точно планировать поставки реагентов. Измерение уровней производится также в различных емкостях очищенной воды, имеющихся на очистной станции.

Давление измеряют во многих случаях; например, в нагнетательной линии насоса, резервуарах высокого давления, фильтрах, воздухо-водяных (паро-водяных) напорных баках, дегазаторах и т. д. Для организации правильной эксплуатации станции фильтрования необходимо получать непрерывную информацию о степени загрязненности загрузки фильтра. Для оценки этого параметра определяют перепад давления или просто давление в случае работы открытого фильтра постоянного уровня.

Измерение температуры очищаемой воды служит источником важной информации для оптимизации работы станции, потому что скорость химических реакций, время флокуляции и активность биомассы — все эти параметры зависят от температуры воды, поступающей на очистку.

Чем больше мы получаем информации о воде в каждый момент времени, тем эффективнее она может быть использована; с этой целью необходимо осуществлять непрерывное автоматическое измерение ряда специфических параметров воды. Такое автоматическое измерение освобождает специалиста от необходимости проводить утомительные, однообразные анализы и значительно уменьшает риск ошибок. К основным измеряемым параметрам относятся: мутность поступающей или очищенной воды, ее удельное сопротивление, величина pH, концентрации определенных растворенных веществ с известными ПДК, оптимальная скорость флокуляции и количество осадка или ила, образующихся при флокуляции или биологической очистке.

Непрерывное измерение мутности дает информацию о степени физического загрязнения очищаемой воды в данный момент времени и качестве водопроводной воды или воды, спускаемой из очистных сооружений. Однако результатов этого измерения не всегда достаточно, чтобы составить четкое представление о качестве воды или о количестве растворенных веществ; во многих случаях должна быть также измерена концентрация определенных веществ.

Непрерывное измерение удельного сопротивления или величины, обратно пропорциональной этому параметру — удельной электрической проводимости — дает представление об общем солесодержании воды. Например, деминерализованная вода имеет высокое удельное сопротивление, из электролитов она содержит только один хлорид натрия. Этот показатель весьма существенен для воды, которая используется в парогенераторах

высокого давления и скоростных парогенераторах, а также в производстве полупроводников. Так как каждый электролит имеет свою удельную электрическую проводимость, результат измерения удельного сопротивления природной воды может быть использован для определения общего солесодержания только в том случае, если относительное содержание различных растворенных солей остается постоянным.

Непрерывное измерение величины pH воды, главным образом, связанной с определением ее жесткости и щелочности, позволяет сделать вывод о том, может ли очищенная вода вызывать накипь или коррозию. Поэтому измерение pH может быть использовано при автоматическом определении количества ингибитора коррозии, которое должно быть добавлено к воде.

Непрерывное измерение концентрации растворенного в воде кислорода производится с целью обеспечения аэробных условий в сооружениях биологической очистки и для контроля состояния поверхностных вод для поддержания в них необходимых условий для жизни водных организмов.

Естественное стремление не сбрасывать в реки вредные вещества с водами, спускаемыми из очистных сооружений, и предотвращать возможность попадания этих веществ в питьевую воду приводит к необходимости автоматизировать процессы измерения концентраций этих веществ в воде. В настоящее время обычно измеряют концентрации таких веществ, как фенол, хром, цианиды, детергенты и т. д. Вред, который может быть нанесен атомными электростанциями в связи с присутствием некоторых растворенных веществ (например, кремнекислоты) в питательной воде котлов и теплообменников, и требование поддержания определенного количества фосфатов приводят к необходимости непрерывной автоматической регистрации концентраций этих веществ. Контролируя щелочность и жесткость и поддерживая эти параметры в определенном диапазоне, можно также избежать накипеобразования.

Не менее важно автоматизировать и процессы измерения количественных бактериологических характеристик воды. Но поскольку это осуществить в настоящее время невозможно, проводят автоматические измерения остаточных концентраций дезинфицирующих реагентов (которые должны быть минимизированы), например хлора и его производных, брома или озона.

Средства измерения перечисленных параметров не всегда используются только для автоматического контроля: иногда их включают в качестве элементов систем регулирования процессов очистки. Например, pH-метр используют для регулирования дозы подкисляющих или нейтрализующих реагентов, прибор, который измеряет концентрацию дезинфицирующих реагентов, включается в контур управления дозатором реагентов и т. д. Фирма «Дегремон» разработала прибор, автоматически рассчитывающий количество коагулянта, которое необходимо ввести в

воду для создания оптимальных условий коагуляции и флокуляции. Техническая ценность этого прибора состоит в том, что при его использовании обеспечивается постоянное оптимальное качество очищенной воды; с экономической точки зрения при этом обеспечивается сокращение расхода реагента.

При очистке сточных вод в аэротенках необходимо знать содержание ила в аэротенке и поддерживать его концентрацию в заданном диапазоне. Для этого используют автоматический прибор для измерения процентного содержания ила по объему (седимометр).

Непрерывное измерение химической потребности в кислороде (ХПК) делает возможным определение нагрузки по химическим окисляемым загрязнениям, содержащимся в воде, поступающей на очистные сооружения. Это же средство может быть использовано для контроля эффективности работы очистных сооружений.

19.1.2. ИЗМЕРЕНИЕ И АВТОМАТИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ ОБЩИХ ПАРАМЕТРОВ

19.1.2.1. Измерение расходов. Расход жидкости измеряют общеизвестными приборами; турбинным или поршневым расходомером поплавкового типа и расходомерами переменного перепада давления с электрическими или пневматическими преобразователями. Но если в жидкости содержится большое количество взвешенных веществ, которые приводят к засорению датчиков, или когда требуется высокая точность измерения в широком диапазоне расходов, то применяют электромагнитный расходомер. Принцип действия его состоит в следующем. Вода, протекающая через изолированную трубу, помещенную в магнитное поле с известной постоянной напряженностью под прямым углом к магнитным силовым линиям, ведет себя как электрический проводник, двигающийся через магнитное поле. Электродвижущая сила вызывает в воде разность потенциалов E, создаваемую между двумя электродами, погруженными в воду перпендикулярно магнитному полю. Эту разность потенциалов рассчитывают по формуле

$$E = KDvH,$$

где D, v, H — соответственно диаметр трубы, скорость движения потока жидкости и напряженность электромагнитного поля.

Практически магнитное поле обычно создают электромагниты переменного тока во избежание поляризации электродов. От электродов сигнал поступает на измерительный усилитель с большим входным сопротивлением, что позволяет исключить влияние сопротивления жидкости (если оно существенно ниже входного сопротивления усилителя) на результат измерения.

Достоинство расходомера этого типа состоит в том, что при его использовании не возникает потерь давления и что его пока-

зания не зависят от содержания в воде взвешенных частиц. Кроме того, поскольку разность потенциалов, регистрируемая на зажимах электродов, пропорциональна скорости движения жидкости, шкала расходомера линейна и нет необходимости использовать функциональный преобразователь для линеаризации шкалы, как это делается в расходомерах переменного перепада давления.

Работа ультразвуковых расходомеров основана на следующем принципе. Если в движущуюся жидкость поместить два вибратора таким образом, что каждый из них может воспринимать ультразвуковые колебания, излучаемые вторым вибратором, то колебания, распространяемые по направлению движения жидкости, быстрее достигают точки размещения приемника, чем колебания, распространяемые в направлении, противоположном движению жидкости. Разность во времени распространения ультразвуковых колебаний может быть записана в следующем виде:

$$\Delta T = 2vd \cos\theta / c^2,$$

где v — скорость движения жидкости; d — расстояние между вибраторами; c — скорость звука в среде; θ — угол между вектором скорости жидкости и ориентированием вибраторов.

Приборы этого типа также имеют линейную шкалу и могут быть использованы для измерения скоростей потока чистых или слегка загрязненных жидкостей в диапазоне от нескольких метров до нескольких сотен кубических метров в час.

19.1.2.2. Методы измерения уровней жидкости. Уровни жидкости при атмосферном давлении могут быть измерены гидропневматическим методом с продувкой воздухом. В приборе этого типа расход воздуха регулируется краном R (рис. 19.2); воздух выходит в виде пузырьков через трубу, погруженную на глубину H от поверхности воды в резервуаре C. Полагая, что потери напора в трубе T незначительны, давление воздуха, измеряемое манометром M, равно высоте столба жидкости над отверстием трубы, через которые выходит воздух. Этот манометр может быть соединен с преобразователем для дистанционной передачи показаний.

В настоящее время отмечается тенденция к созданию универсальных систем, которые можно использовать для измерения уровней жидких и порошкообразных веществ. К ним относятся мембранные и емкостные измерительные системы.

Принцип действия мембранных приборов основан на том, что мембраны деформируются пропорционально нагрузке, приложенной к ней. Деформация мембраны может быть преобразована в электрический сигнал при перемещении движка потенциометра, сердечника дифференциала трансформатора или с помощью тензодатчика. Получаемый при этом электрический сигнал пропорционален силе, приложенной к мембране. Уровень заполнения резервуара жидкостью или твердыми веществами с известной

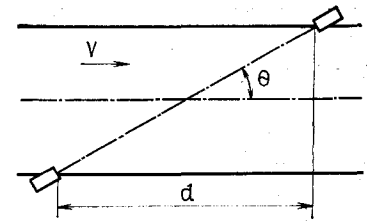


Рис. 19.1. Схема действия ультразвукового расходомера

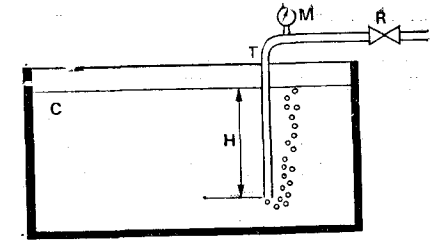


Рис. 19.2. Измерение уровней жидкостей гидропневмостатическим методом с продувкой воздухом

плотностью может быть определен с помощью мембраны, размещаемой в дне резервуара.

Основное достоинство емкостных измерительных систем состоит в том, что в них нет движущихся частей.

Конденсатор, состоящий из двух размещенных в резервуаре электродов E_1 и E_2 (рис. 19.3) с пластмассовым покрытием на одном из электродов, питается от источника переменного тока. Любые измерения глубины жидкости (твердого вещества) изменяют емкость конденсатора и, следовательно, полное сопротивление настолько, что при стабильном напряжении источника питания ток в измерительной цепи определяется уровнем жидкости или твердого вещества в резервуаре.

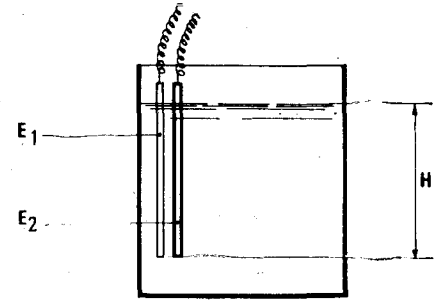


Рис. 19.3. Емкостная система измерения уровня

Ультразвуковые приборы для измерения уровней являются бесконтактными устройствами и их целесообразно использовать в агрессивных (коррозионных) средах. В связи со значительной стоимостью этот тип приборов пока используется только для решения особенно трудных проблем. Основной принцип действия этих приборов заключается в том, что ультразвуковой сигнал, излучаемый периодически вибратором, отражается от свободной поверхности продукта, уровень которого мы измеряем, и возвращается в приемник. Время между излучением сигнала и приемом отраженного сигнала пропорционально расстоянию между вибратором и поверхностью продукта, т. е. уровню заполнения резервуара.

19.1.2.3. Измерение потерь напора. Определение потерь напора в фильтрах эквивалентно измерению давления. Например, дифференциальный манометр может быть подключен к точкам выше и ниже фильтрующей загрузки. Измеряемая им разность

давлений представляет собой потери напора, которые оцениваются по шкале манометра или передаются на дистанционное дисплейное устройство с помощью потенциометра, дифференциального трансформатора или тензодатчика.

19.1.2.4. Измерение температуры воды. Температура воды обычно измеряется термометром сопротивления, при этом измерительный сигнал может быть передан на расстояние. Принцип действия термометров сопротивления основан на том, что удельное сопротивление металлов увеличивается с температурой и сила электрического тока, протекающего через такое сопротивление от источника постоянного напряжения, следовательно, обратно пропорциональна температуре окружающей среды.

19.1.3. АВТОМАТИЧЕСКОЕ ИЗМЕРЕНИЕ И КОНТРОЛЬ ПАРАМЕТРОВ СОСТАВА ВОДЫ

Для измерения и контроля параметров состава воды используют автоматизированные стандартные методы анализов. К ним относятся нефелометрические анализы (определение мутности), измерение удельного сопротивления (определение минерализации), потенциометрические анализы (определение pH), амперометрические анализы (определение содержания окислителей, т. е. хлора, озона, брома), фотоколориметрические и титрометрические анализы (определение концентраций определенных веществ, растворенных в воде). Используют и другие типы приборов, принцип работы которых основан на новых методах, для измерения концентрации ила в воде или определения оптимальной дозы коагулянта, необходимой для флокуляции.

Различные типы автоматических приборов можно классифицировать на две основные группы: для физических измерений и для химических анализов; в последних перед измерениями автоматически осуществляется одна или более химическая реакция.

19.1.3.1. Автоматические методы физических измерений.

Турбидиметры. Фирма «Дегремон» выпускает три типа турбидиметров, используемых в соответствии с характером анализируемой воды. Во всех трех случаях мутность определяют измерением количества света, рассеянного согласно эффекту Тиндаля присутствующими в воде взвешенными частицами.

Турбидиметр типа EP (рис. 19.4) — это высокочувствительный прибор с порогом чувствительности ниже 0,05 единиц Джексона. Он предназначен для измерения мутности чистой воды. Турбидиметр типа EP состоит из резервуара с постоянным уровнем *1*, в котором вода может быть деаэрирована. Из резервуара *1* вода с постоянным расходом поступает в измерительный резервуар *2*, в котором размещены два фотосопротивления *3*, погруженные непосредственно в воду. Эти фотосопротивления установлены под прямым углом к световому лучу *4*, сфокусированному линзой, одна сторона которой также погружена в воду при анализах.

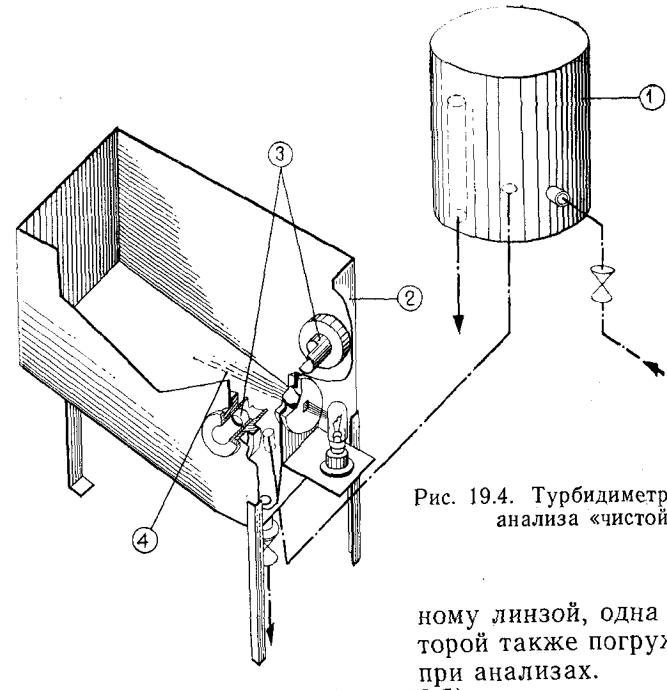


Рис. 19.4. Турбидиметр типа EP для анализа «чистой воды»

Турбидиметр типа ES (рис. 19.5) не имеет оптической поверхности, контактирующей с водой при анализе, и поэтому в основном его применяют для анализа очень мутной воды. Он основан на принципе измерения мутности на поверхности. Анализируемая жидкость с постоянным расходом поступает из переливного резервуара во второй резервуар через отверстие в его дне и через перелив вытекает из второго резервуара.

Световой луч касается поверхности воды под таким углом, что на фотосопротивление, расположенное над поверхностью воды приблизительно под прямым углом к плоскости отражения, не попадают ни прямой, ни отраженный луч. Свет рассеивается частицами суспензии в воде, изменяя в соответствии с количеством частиц сопротивление фотоэлемента, по которому судят о мутности воды.

Этот турбидиметр был модернизирован для использования при анализе жидкостей, содержащих большое количество взвешенных веществ, которые способны осаждаться в трубопроводах и забивать их. Так турбидиметр типа ES фирмы «Дегремон» имеет устройство, которое автоматически опорожняет и очищает трубопроводы через определенные интервалы времени. В режиме очистки, производимой с регулируемыми интервалами, измерительная схема прибора отключается.

Все перечисленные типы приборов имеют наборы сменных шкал, охватывающих различные диапазоны измерения. Резуль-

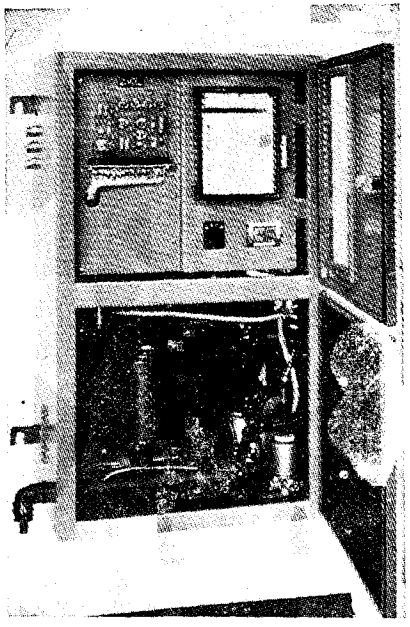


Рис. 19.5. Турбидиметр типа ES

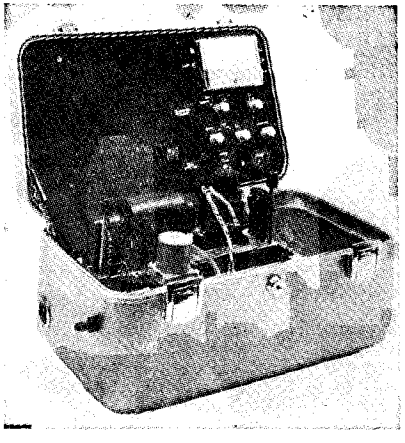


Рис. 19.6. Коагулометр

тат может быть получен в области наибольшей точности.

«Коагулометр» (рис. 19.6), разработанный фирмой «Дегремон», позволяет определить количество коагулирующего вещества, которое следует добавить к данной воде, чтобы осуществить оптимальную флокуляцию. Принцип работы прибора состоит в следующем. В емкость, где выполняются анализы, вмонтированы два параллельных плоских палладиевых электрода, к которым подводится постоянное напряжение, создающее электрическое поле с напряженностью приблизительно 10^3 В/м. Через жидкость, в плоскости, параллельной электродам, и в непосредственной близости к отрицательному электроду пропускают плоский световой луч, который проходит через щель шириной в несколько десятых миллиметра.

Измерительный элемент, размещенный на внешней стороне резервуара, противоположной источнику света, преобразует световой поток в электрический сигнал.

Когда вода, содержащая коллоиды, но без коагулирующего вещества, наливается в резервуар, то появление постоянного электрического поля между электродами способствует тому, что электроотрицательные коллоиды перемещаются по направлению к положительному электроду, очищая зону, через которую проходит световой луч. Когда такое же электрическое поле между электродами воздействует на пробы воды, содержащие увеличивающиеся количества коагулянта, то скорость перемещения коллоидов уменьшается до нуля по мере нейтрализации их электрического заряда. В этих условиях будет наблюдаться незначительное изменение количества передаваемого света.

На рис. 19.6 представлен вариант портативного коагулометра фирмы «Дегремон», в который пробы и реагент наливают вручную.

Измеритель удельного сопротивления. Чистая вода обладает определенным удельным электрическим сопротивлением, которое, при отсутствии растворенных солей зависит от степени диссоциации молекул воды, изменяющейся с температурой. Любая растворенная соль повышает удельную электрическую проводимость воды, измеряемую в мк·См/см и изменяющуюся в зависимости от концентрации соли. Когда вода содержит несколько солей одновременно, практически невозможно установить взаимосвязь между ее удельным электрическим сопротивлением (соответствующим ее электрической проводимости) и солесодержанием. Только в случае деминерализованной воды, когда в ней, как правило, содержатся только ионизированные соли натрия, возможно установить связь между удельным электрическим сопротивлением и солесодержанием. Те же принципы могут быть использованы при автоматическом регулировании дозирования кислых и основных растворов, используемых для регенерации ионообменников.

Принцип работы такой системы достаточно прост и состоит в измерении величины электрического тока, проходящего через зажимы двух электродов с известными формой и размерами, которые погружены в воду и к которым приложено постоянное напряжение. На практике, чтобы избежать явления поляризации, к электродам подводится напряжение переменного тока, частоту которого следует увеличивать пропорционально увеличению концентрации кислот, солей или оснований в растворе.

Так как удельное электрическое сопротивление воды зависит от степени диссоциации молекул в растворе, наиболее сложная аппаратура дополнена блоком измерения температуры с помощью термисторов с введением температурной коррекции удельного сопротивления. Результаты измерения получаются приведенными к температуре 20 °С. При измерении удельного сопротивления наиболее чистой воды необходимы самые сложные схемы введения температурной коррекции, потому что зависимость удельного сопротивления от температуры перестает быть линейной.

Если измеряют удельную электрическую проводимость жидкости, содержащей взвешенные вещества (например, речной воды, содержащей ил), взвешенные вещества могут отлагаться на измерительных электродах, образуя пленку, увеличивающую сопротивление и снижающую точность измерения. В этом случае может возникнуть необходимость часто очищать электроды, между тем очистка, даже один раз в сутки, не может гарантировать высокую точность показаний. Для решения вопроса ис-

пользуют два вспомогательных электрода, погруженных непосредственно в жидкость.

В этом случае измерительная ячейка снабжается четырьмя электродами. Через два больших токовых электрода пропускают ток, автоматически поддерживаемый на постоянном уровне (при появлении отложений любой толщины увеличивается падение напряжения в приэлектродном пространстве). На некотором расстоянии от токовых электродов во внутриэлектродном пространстве существует зона, в которой разность потенциалов между двумя точками определяется только силой тока и удельным электрическим сопротивлением среды.

Если в двух точках этой зоны размещены два измерительных электрода, подключенные к усилителю с высоким входным сопротивлением, любые отложения не оказывают никакого влияния на результат измерения. При использовании кондуктометров описанного типа можно в 10 раз уменьшить частоту очистки электродов.

Такие четырехэлектродные ячейки позволяют в значительной мере уменьшить поляризацию измерительных электродов. Их целесообразно использовать для измерения малых значений удельного сопротивления растворов. По величине удельного электрического сопротивления можно контролировать концентрации кислых и основных растворов вплоть до 20%.

На рис. 19.7 показан многоканальный измеритель удельного сопротивления, который позволяет производить непрерывные измерения с автоматическим переключением шести каналов. К каждому каналу с двумя сменными шкалами прилагается проточная ячейка с вмонтированным в нее автоматическим температурным компенсатором и регулируемой системой сигнализации.

Надежность и устойчивость современных электронных блоков делают возможным значительное сокращение объема работ по корректировке и техническому обслуживанию измерительных систем, используемых при очистке воды.

На основании последних достижений были разработаны конструкции компактных приборов, в которых преобразователь сигнала и показывающий прибор размещены в одном корпусе. Этот корпус может быть смонтирован непосредственно на пульте с дисплейными устройствами, располагаемом в лаборатории или на специальном посту управления. Измеритель сопротивления фирмы «Дегремон» (рис. 19.8) относится к этой категории компактных приборов. Он может быть использован для проведения измерений в области от 10 Ом·см до 1 МОм·см.

pH-метры. В промышленном масштабе величину pH всегда измеряют электрометрическим способом с использованием двух электродов: электрода сравнения и индикаторного электрода. Причем электрод сравнения погружен в раствор, содержащий определенную концентрацию ионов водорода. Контакт электро-

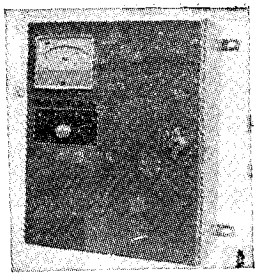


Рис. 19.8. Компактный измеритель удельного сопротивления

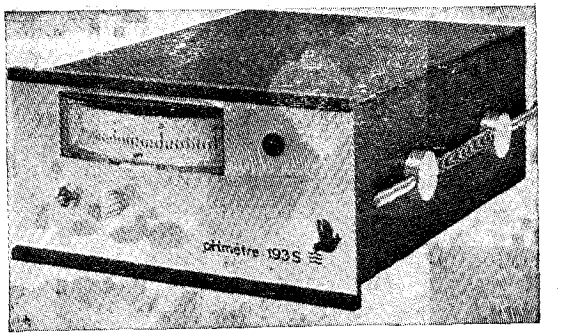


Рис. 19.7. Многоканальный измеритель удельного сопротивления

да сравнения с контролируемым раствором, в который погружен индикаторный электрод, осуществляется посредством электролитического ключа, представляющего собой пористую перегородку. Разность потенциалов, возникающая между индикаторным и вспомогательным электродами, является линейной функцией концентрации ионов водорода в анализируемом растворе. Показание величины pH получают с помощью вольтметра, соединенного с зажимами электродов.

На практике используются датчики с вмонтированными в них электродами. Существует несколько типов индикаторных электродов. Наиболее точными считаются водородный и хингидронный электроды (оба используют только в лабораторных исследованиях), сурьмяный электрод, который благодаря своей прочности нашел применение в промышленности, и универсальный стеклянный электрод. Стеклянный электрод состоит из трубки, на конце которой напаян тонкостенный шарик-мембрана; внутри его содержатся серебряный электрод и буферный раствор.

В качестве вспомогательного электрода обычно используют каломельный или хлорсеребряный. Наиболее часто применяют первый из них, как правило, выполненный в форме трубки, на дне которой помещается ртуть, поверх нее каломель, а остальное пространство заполнено раствором хлорида калия; раствор хлорида калия медленно диффундирует в жидкость через проницаемую мембрану.

Величину pH, следовательно, определяют измерением э. д. с. датчика, в котором один электрод — стеклянный — имеет очень высокое внутреннее сопротивление (несколько мегом); э. д. с. достигает несколько милливольт и должна быть измерена во избежание поляризации электродов без протекания через них тока.

В промышленности используют два типа pH-метров. В одном из них измерение производят компенсационным методом, т. е.

к электродам прикладывается известное напряжение, равное вырабатываемой э. д. с. и противоположной полярности; измерение происходит без протекания тока через электроды. Во втором типе прибора электроды соединены с линейным усилителем, который имеет оченнь высокое входное сопротивление и его выход соединен с вольтметром, градуированным в единицах pH.

Датчики могут быть погружного и проточного типа и могут быть оборудованы механическим очищающим устройством. Так как сопротивление стеклянного электрода изменяется с температурой, то в pH-метрах, использующих электроды этого типа, обычно применяется автоматическая температурная компенсация.

На рис. 19.9 представлен pH-метр фирмы «Дегремон», вся шкала может соответствовать одной единице pH. Это оборудование принадлежит к той же серии компактных приборов, что и прибор для измерения удельного электрического сопротивления (см. рис. 19.8).

Измерение окислительно-восстановительного потенциала $E_н$ также включает измерение потенциала индикаторного электрода, обычно изготавливаемого из полированной платины. Эта величина определяется в среде азота.

pH-метр может быть использован для определения концентрации специфических ионов (например, натрия и хлорид-ионов) при применении ион-селективных электродов в качестве датчиков. Активность ионов натрия может быть измерена со стеклянным электродом, тогда как для измерения хлорид-ионов применяют пару электродов серебро-хлорид серебра.

Амперометрические устройства. При промышленной водоподготовке для непрерывного измерения концентраций окислителей нашел применение упрощенный метод амперометрического анализа. Измерительная ячейка, через которую с постоянной скоростью протекает анализируемая вода, содержит поляризованный катод, изготовленный из инертного материала (например, из платины) и анод, который может быть изготовлен из меди, кадмия, серебра и т. д. В отсутствии окислителей такая измерительная ячейка поляризована и через нее может протекать небольшой ток; при ее деполяризации окислителем, восстанавливающимся на катоде, проходит ток, практически пропорциональный концентрации окислителя.

Этот метод обычно используют для измерения содержания в воде хлора, брома, озона и кислорода. Если вещество, концентрацию которого определяют, способно образовывать такие соединения, как хлорамины, то в случае определения хлора необходимо автоматически поддерживать значение pH для определения общего хлора (свободного и связанного). В измерительной ячейке обычно размещают мешалку для постоянного обновления состава жидкости в прикатодном пространстве, т. е. для подведения к катоду непрореагировавшего деполяризатора

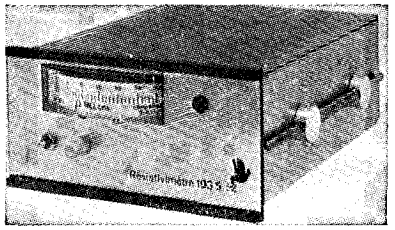


Рис. 19.9. pH-метр

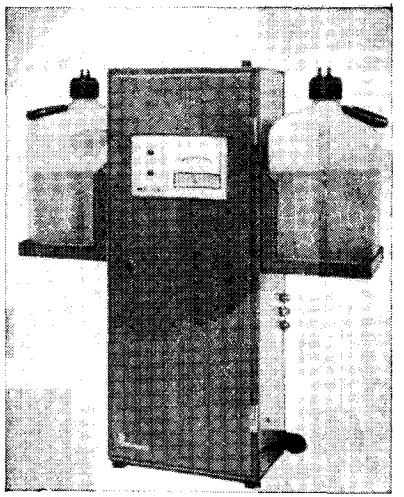


Рис. 19.10. Амперазер (амперометрическое устройство)

и отвода продуктов реакции. Электроды очищают либо стеклянными шариками, движущимися по поверхности электродов благодаря течению анализируемой воды, либо щеткой с электроприводом.

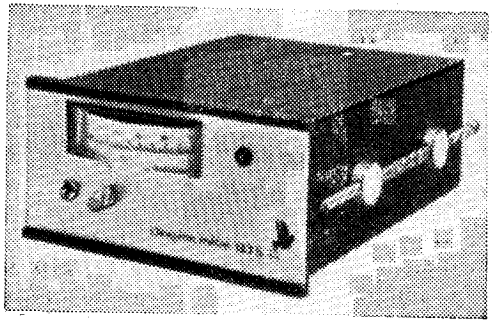


Рис. 19.11. Кислородомер

Недостаток таких систем состоит в том, что этим методом измеряется общее содержание окислителей, и использовать приборы этого типа можно при наличии в растворе изменяющихся концентраций только одного вещества. При этом мешающее влияние других веществ, присутствующих в постоянных концентрациях, может быть устранено подстройкой нуля прибора.

Амперометрическими устройствами называют также приборы, используемые для полярографического измерения концентрации кислорода, например анализаторы (рис. 19.11). Датчик такого прибора состоит из золотого катода и серебряного анода с постоянным наложенным напряжением.

Электроды помещены в ячейку, заполненную гелеобразным раствором хлорида калия и отделенную от анализируемой среды тефлоновой мембраной. Растворенный кислород диффундирует через мембрану и участвует в окислительно-восстановительной реакции:

$$O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-,$$

за которой следует реакция электролиза

$$4Ag^{-} + 4Cl^{-} \rightarrow 4AgCl + 4e^{-}.$$

Сила тока пропорциональна парциальному давлению кислорода в жидкой фазе.

Оборудование для измерения процентного содержания ила (седимометр). При очистке сточных вод очень важно знать процентное содержание ила в аэротенке, так как эта информация дает возможность оптимизировать скорость процесса илоотделения.

Измерительная система фирмы «Дегремон» (рис. 19.12) обеспечивает постоянное измерение этого параметра и автоматическое регулирование илоотделения.

По существу, она включает пробирку, на одной стороне которой, параллельно образующей к поверхности, смонтирован ряд фототранзисторов и лампа стержневого типа. Через постоянные интервалы времени пробу ила помещают в пробирку и дают возможность взвеси оседать в течение определенного периода. Затем включают лампу и фототранзисторы, не закрытые илом, под действием света генерируют сигнал, пропорциональный числу освещенных фотоэлементов. Устройство оборудовано системой автоматической очистки пробирки после каждого измерения. Этот прибор снабжен двумя мини- или максиконтактами, которые могут быть использованы для регулирования процесса илоотделения.

Прибор для измерения плотности. Ареометрическое определение массы взвешенных веществ в активном иле — «ювелирная» операция, которая должна быть выполнена с погрешностью не более одной десятитысячной. Определяемая величина является, по существу, не плотностью суспензий, а отношением избыточной массы взвешенных веществ к массе соответствующего объема воды при данной температуре или, более точно, к массе объема суспензоида (который фактически является раствором нескольких минеральных солей и газов в воде). Эта избыточная масса не изменяется с изменением температуры или содержания растворенных солей в суспензоиде, тогда как изменение плотности, определяемой по отношению к дистиллированной воде при температуре 4 °С, в значительной мере обусловлено этими факторами (рис. 19.13).

Измерение состоит в сравнении высоты двух столбиков жидкости, содержащих соответственно анализируемый ил и суспензоид при одинаковом гидростатическом давлении.

Две измерительные трубки на различных уровнях присоединены к вертикальной градуированной трубке, в которой медленно циркулирует исследуемый ил; взвешенные вещества удаляются из измерительных трубок седиментацией, после чего в трубках остается суспензоид.

Рис. 19.12. Седимометр

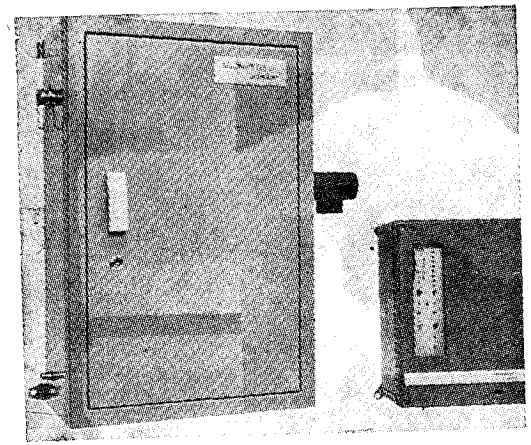
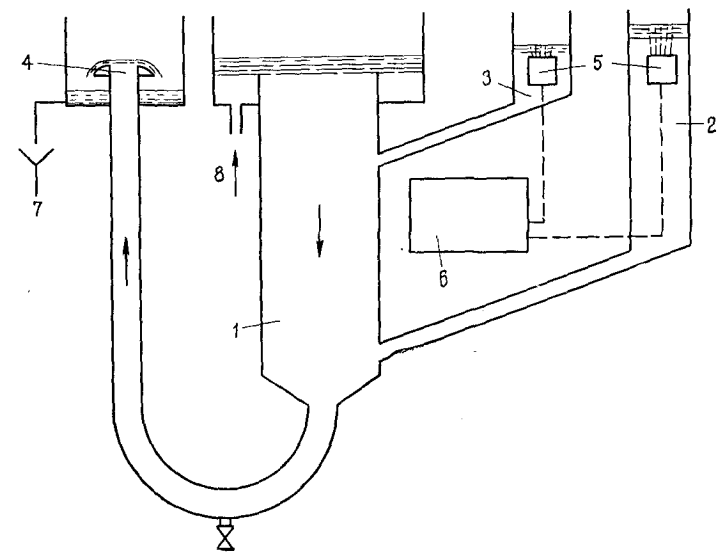


Рис. 19.13. Автоматический измеритель плотности активного ила

1 — иловая труба; *2* — нижняя измерительная трубка; *3* — верхняя измерительная трубка; *4* — водослив на выходе измерителя; *5* — ультразвуковые вибраторы; *6* — ультразвуковой генератор; *7* — сброс ила; *8* — ввод ила



Незначительная разница между уровнями жидкости в двух измерительных трубках является мерой массы взвешенных веществ. Эта разница равна произведению избыточной массы на коэффициент, зависящей от полезной длины градуированной трубы (расстояние между входными отверстиями измерительных трубок).

Разницу в уровнях измеряют ультразвуковым уровнемером, состоящим из двух вибраторов, погруженных на несколько сантиметров ниже уровней жидкости в измерительных трубках.

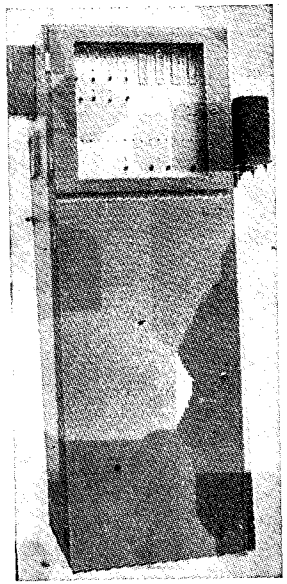


Рис. 19.14. Фотоколориметр

Каждый вибратор излучает сигнал, который отражается от поверхности жидкости; для определения уровня жидкости в каждой трубке измеряют время, за которое сигнал проходит это расстояние. Разность между уровнями в измерительных трубках пропорциональна разности времени распространения ультразвуковых сигналов.

На с. 961 приводится подробное описание устройства «Понсариметра», которое может быть использовано в затруднительных случаях для быстрого определения массы взвешенных веществ, содержащихся в активном иле.

19.1.3.2. Автоматические методы химических анализов. Автоматические фотоколориметры применяют для предварительного автоматического фотоколориметрического количественного анализа некоторых веществ, растворенных в воде.

Растворенное вещество, концентрацию которого необходимо измерить, с помощью соответствующих реагентов превращается в окрашенное, обычно комплексное соединение; причем интенсивность окраски возрастает с увеличением концентрации вещества. Определение состоит в измерении интенсивности светопропускания через раствор. Согласно экспоненциальному закону Ламберта — Бэра, интенсивность светопропускания обратно пропорциональна концентрации определяемого вещества. Этот метод теперь используют для полностью автоматизированного определения концентраций кремниевой кислоты, фосфатов, фенолов, детергентов, железа и гидразина и измерения жесткости умягченной воды с погрешностью не более 0,1 мг-экв/л.

Автоматические фотоколориметры так надежны, что могут быть использованы при автоматическом регулировании процесса водоподготовки. Например, автоматический фотоколориметр фирмы «Дегремон» (рис. 19.14) применяют для непрерывного контроля за содержанием кремниевой кислоты в воде на выходе из ионообменной деминерализующей установки. Прибор выдает сигнал на прекращение процесса водоподготовки и, если необходимо, на переключение на режим автоматической регенерации, когда количество кремниевой кислоты в воде превышает установленное допустимое значение. Этот прибор содержит ряд автоматических блоков контроля, обеспечивающих максимальную надежность работы; например, при появлении неисправности в измерительном мостике, в подаче воды или реагентов, требуемых для образования окрашенных соединений, процесс измерения прекращается.

В многоканальном варианте этого прибора каждая измерительная цепь состоит из самостоятельных блоков. Каналы независимы друг от друга; каждый канал имеет свою собственную шкалу.

Автоматические титраторы измеряют содержание химических веществ с помощью титрования. Существует заданная аналитическая последовательность: стандартный раствор соответствующего реагента постепенно добавляют к пробе воды известного объема; реагент взаимодействует с анализируемым элементом, образуя известное соединение. Реакция заканчивается при определенной величине pH, которая фиксируется или стандартным pH-метром, или по изменению цвета воды, благодаря присутствию предварительно добавленного индикатора. Примером прибора, в котором конечная точка реакции определяется измерением величины pH, может служить титратор гидроокиси натрия фирмы «Дегремон» (лицензия фирмы «Шелл»).

Приборы, работающие по принципу изменения цвета, бывают двух типов.

Первые, титраторы с заданной установкой, автоматически контролируют содержание химических веществ без количественного определения, насколько концентрация анализируемого элемента превышает заданное значение. В этом приборе определенное количество стандартного титрованного раствора добавляют через постоянные интервалы времени к известному объему воды, содержащей окрашивающий индикатор.

Фотоэлектрический прибор контролирует изменение цвета. Этот тип прибора может быть использован, например, при автоматическом контроле работы установки по умягчению воды (контроль жесткости), обменника с карбоксиловой смолой (контроль карбонатной щелочности) или очистителя извести (контроль общей или карбонатной щелочности).

Прибор второго типа, измеряющий титратор, работает по тому же принципу с преобразованием количества введенного титранта (по завершении реакции) в концентрацию анализируемого вещества.

Аналогично фотоколориметрам титраторы фирмы «Дегремон» также выпускаются в многоканальном исполнении и имеют те же самые блоки контроля.

19.1.3.3. Станция автоматического контроля. Контроль качества поверхностных вод требует измерения таких параметров, как pH, удельное сопротивление, растворенный кислород, температура и мутность. Также полезно знать и концентрацию аммиака.

Станция автоматического контроля фирмы «Дегремон» (рис. 19.15) непрерывно измеряет эти параметры. Она была разработана специально для контроля качества воды в реках в точках водозабора. В анализаторе аммиака использован для анализов автоматический колориметр такого же типа, как и по-

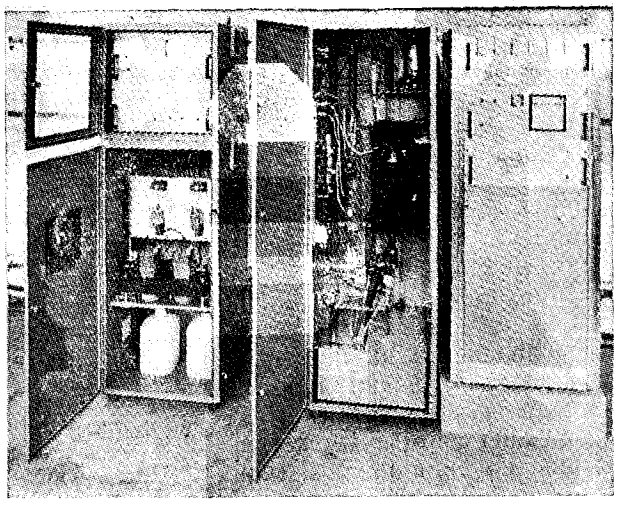


Рис. 19.15. Станция автоматического контроля фирмы «Дегремон»

казанный на рис. 19.14. Остальные датчики размещены в центральном шкафу. В правом отделении расположены все электронные приборы, источник питания, блок автоматического управления работой станции, измерительный усилитель, пороговые элементы блока сравнения и многоканальные показывающие и самопишущие приборы.

Применяемый турбидиметр разработан на основе прибора типа EP фирмы «Дегремон» и оборудован устройством автоматической очистки контактирующих с водой поверхностей. В приборе, измеряющем удельное сопротивление, используется четырехэлектродная измерительная ячейка, на которую побочные явления влияния не оказывают. Электроды, используемые для измерения величины pH и растворенного кислорода, периодически очищают струей воды.

19.1.3.4. Биотесты с использованием рыб. Биологические исследования, выполняемые на живых организмах, дополняют результаты физико-химических анализов, полученные с использованием станций автоматического контроля такого же типа, как рассмотренная выше. Поведение некоторых водных организмов, и особенно рыб, содержащихся в резервуаре, оборудованном сигнальным устройством, используется как метод всестороннего контроля биологического качества поверхностных вод.

Установка фирмы «Дегремон» для проведения биотеста на рыбах (рис. 19.16) включает четыре длинных узких канала, через которые последовательно протекает с постоянной скоростью анализируемая вода. Рыбу (предпочтительнее радужную форель, наделенную естественным стремлением плыть против течения) помещают в каждый из этих каналов. Если в воде нет загрязнений, рыба остается в верхней по течению части канала.

Если в воду введены токсичные вещества, то физическое состояние рыбы ухудшается, она не может противостоять течению и сносится по направлению к фотооптической преграде. Когда рыба ударяется о преграду, импульсы с амплитудой в несколько вольт подаются на электроды через интервал в 1 с.

При этом возможны три ситуации:

или форель ударяется о преграду случайно и плывет обратно против течения, проплывая часть канала после получения первого импульса;

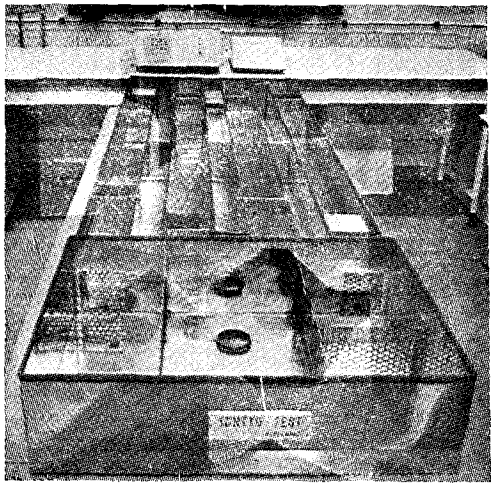


Рис. 19.16. Установка для проведения биотестов с использованием рыб

или форель устала и отплывает от преграды только после четырех или пяти импульсов;

или погибшая рыба заслоняет фотооптическую преграду до прибытия оператора.

Вся эта информация записывается печатающим устройством; предупредительная сигнализация: «1 — рыба жива», «2 — рыбы больны» и «3 — рыбы погибли» может быть передана на расстояние.

19.2. АВТОМАТИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ

19.2.1. ОБЩИЕ ПРИНЦИПЫ

Автоматическое регулирование осуществляется с помощью регулятора, который обеспечивает поддержание определенной взаимосвязи между двумя физическими параметрами x и y. Они считаются связанными через объект регулирования, если воздействие x на y вызывает такое воздействие y на x по линии отрицательной обратной связи, которое направлено на возвращение величины x к исходному значению. x является регулируемой величиной, а y — регулирующей. Если x_0 — заданное значение регулируемой величины, которая в какой-то момент времени изменяется до x, система вырабатывает воздействие на y. Значение y изменяется таким образом, чтобы уменьшить рассогласование между x_0 и x и возвратить x к исходному значению. При любых возмущающих воздействиях, приводящих к отклонению x от заданного значения x_0, замкнутая система авто-

матического регулирования вырабатывает воздействие на объект регулирования, обеспечивающее стабильность регулируемой величины x_0.

Система автоматического регулирования включает:

датчик для измерения значения регулируемой величины;

регулятор, который сравнивает текущее значение x и заданное значение регулируемой величины x_0 и вырабатывает командный сигнал на изменение регулирующей величины:

исполнительный механизм, который изменяет значение регулирующей величины.

При сравнении измеренной регулируемой величины с заданным ее значением получают сигнал рассогласование $x - x_0$, который усиливается и корректируется регулятором. В ряде случаев возможно появление колебаний в системе; такую систему называют неустойчивой.

Если режим работы системы может быть описан функцией, не зависящей от времени, его называют стационарным режимом. Изменение какого-либо из параметров системы приводит к тому, что функционально с ним связанный параметр также изменяет свое значение, однако переход этот происходит не мгновенно и параметр достигает своего установившегося значения, изменяясь экспоненциально или с затухающими колебаниями. Этот режим называют переходным.

19.2.2. ЧЕТЫРЕ СПОСОБА РЕГУЛИРОВАНИЯ

19.2.2.1. Двухпозиционное регулирование типа «включено — выключено» — наиболее простой способ регулирования. Например, имеется резервуар с регулируемым уровнем h, из которого отводится вода с переменным расходом, зависящим от потребителя. Система содержит отсечной клапан на линии подачи воды в резервуар (рис. 19.17), который закрыт, если повышается уровень воды в резервуаре h_0 на величину Δh_1, и открыт, когда уровень снижается относительно h_0 на величину Δh_2. При этом простом способе регулирования, как правило, уровень воды в резервуаре нельзя поддерживать абсолютно постоянным за исключением тех случаев, когда резервуар имеет очень большую вместимость по сравнению с расходом воды. В этом случае для улучшения характеристик работы системы используют регулятор с достаточно большой зоной нечувствительности.

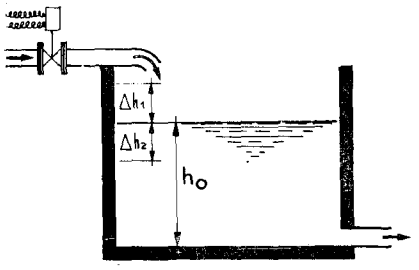


Рис. 19.17

19.2.2.2. Использование пропорционального (П) закона регулирования. При использовании этих регуляторов отклонение регулируемой величины относительно заданного ее значения в каждый момент времени приводит к пропорциональному изменению регулирующей величины. Можно доказать математически, что при постоянном возмущении пропорциональный регулятор не может поддерживать заданное значение регулируемой величины; отклонение регулируемой величины от заданного значения может быть устранено при дополнительном введении интегрального закона регулирования. Пропорциональное регулирование обеспечивает линейную зависимость между регулируемой и регулирующей величинами. Настроечный параметр пропорционального регулятора часто представляют в виде величины, обратной коэффициенту усиления и называемой зоной регулирования или пределом пропорциональности. Этот параметр выражают в процентах. Величину зоны регулирования изменяют подстройкой коэффициента усиления, т. е. угла наклона линейной статической характеристики регулятора. Отклонение установившегося значения регулируемой величины от заданного значения уменьшают, увеличивая коэффициент усиления регулятора (сужая зону регулирования), но при большом коэффициенте усиления могут появиться незатухающие колебания и система перестанет быть устойчивой. Для решения этой проблемы в зоне регулирования вводят интегральную составляющую.

19.2.2.3. Использование интегрального (И) закона регулирования. Регулятор вырабатывает сигнал, пропорциональный интегралу отклонения текущего значения регулируемой величины от задания за время T. Этот закон регулирования может быть представлен в следующем виде:

$$dy/dt = -Kx,$$

где y и x — значения регулирующей и регулируемой величин соответственно; K — коэффициент пропорциональности, который называют коэффициентом настройки интегрального регулятора.

В регуляторе, отрабатывающем пропорционально-интегральный (ПИ) закон регулирования, наличие интегральной составляющей позволяет исключить статическую ошибку между заданным и установившимся значением регулируемой величины, появляющуюся при пропорциональном регулировании. Пропорционально-интегральный закон регулирования обеспечивает достижение заданного значения регулируемой величины за некоторый промежуток времени, длительность которого зависит от величины воздействия интегральной составляющей. Поскольку воздействие, вырабатываемое пропорциональной составляющей регулятора, не зависит от времени, а воздействие, вырабатываемое интегральной составляющей, является функцией времени, увеличивающейся по модулю с течением времени, пропорционально-интегральный закон регулирования не может отрабатывать мгновенные интенсивные возмущения. Для выработки регулятором воздействия, которое было бы пропорционально

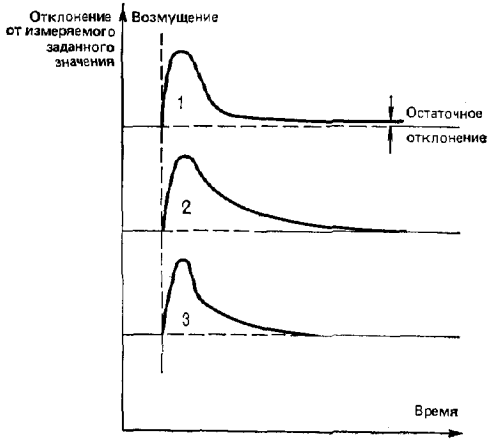


Рис. 19.18. Три закона регулирования
1 — отклонение от измеряемого заданного значения; *2* — возмущение; *3* — остаточное отклонение

скорости изменения возмущения, необходимо использовать дифференциальный закон регулирования.

1.9.2.2.4. Дифференциальный (Д) закон регулирования. При дифференциальном законе регулирования вырабатывается воздействие, пропорциональное скорости отклонения регулируемой величины от задания. Этот закон может быть записан в следующем виде:

$$y = -K\frac{dx}{dt}.$$

По существу, это означает сужение зоны регулирования пропорциональной составляющей регулятора в момент появления возмущения или, другими словами, повышение чувствительности регулятора и затем возвращение к пропорциональному закону регулирования после прекращения действия возмущения.

На рис. 19.18 представлено графическое изображение в упрощенном виде изменения во времени регулируемой величины при резком возмущении для каждого из трех законов регулирования. При пропорциональном законе регулирования (кривая *1*) остается некоторое рассогласование между заданным и установившимся значением регулируемой величины. При пропорционально-интегральном законе (кривая *2*) регулируемая величина постепенно приближается к заданному значению. При пропорционально-интегрально-дифференциальном (ПИД) законе регулирования (кривая *3*) регулируемая величина достигает установившегося значения значительно быстрее. Кривые отражают характер переходного процесса при использовании идеальных регуляторов. В действительности этот процесс всегда сопровождается бóльшими или меньшими колебаниями, зависящими от относительного влияния каждой составляющей закона регулирования.

Основная цель использования комбинированного ПИД закона регулирования состоит в автоматическом поддержании изменяющейся величины на заданном уровне. Часто требуется решать более сложную задачу, когда следует изменять значение регулируемой величины в зависимости от какого-либо другого параметра, или когда используют программный регулятор, изменяющий во времени значение регулируемой величины.

При некоторых производственных процессах, когда требуется выполнить множество сложных регулировочных работ, намечается тенденция к централизации управления всеми процессами с помощью цифровой вычислительной машины, которая при этом работает в режиме разделения времени. Вычислительная машина, конечно, комплектуется различными типами периферийного оборудования, такими как запоминающие устройства, используемые для сохранения сигналов между двумя последовательными командами, цифро-аналоговые преобразователи, необходимые для получения на выходе машины унифицированного аналогового сигнала, подаваемого на исполнительные механизмы и т. д.

19.2.3. ВЫБОР МЕТОДА РЕГУЛИРОВАНИЯ

19.2.3.1. Выбор закона регулирования. При решении вопроса о выборе наилучшего метода регулирования должны быть проанализированы все аспекты этого вопроса.

Прежде всего необходимо выбрать регулирующую переменную y, связанную через объект регулирования с регулируемой величиной x таким образом, что последняя может после некоторых изменений своего значения, вызванных внешним воздействием, прийти к установившемуся заданному значению x_0.

После того как выбрана регулирующая величина, приступают к анализу всех звеньев системы: объекта регулирования, системы контроля, системы регулирования и корректирующей системы. Объект регулирования может по-разному реагировать на изменения регулирующей величины и обладать при этом различной инерционностью. Система измерения регулируемой величины может вносить элемент запаздывания в процесс регулирования, что суммируется с временем задержки самого регулятора и некоторой инерционностью корректирующей системы. Необходимо уточнить, не является ли суммарное запаздывание слишком большим, так как корректирующая система может вступить в действие слишком поздно, например, когда изменится знак отклонения.

Поэтому выбираемый метод регулирования зависит как от природы объекта регулирования, так и от требуемой точности регулирования.

Закон пропорционального регулирования, как правило, не может обеспечить высокой точности регулирования. Однако получаемая при этом законе регулирования погрешность часто не выходит за пределы допустимой, например, при регулировании уровня, для чего может быть использована относительно узкая зона регулирования, и процесс при этом сопровождается небольшими незатухающими колебаниями. В ряде случаев, как, например, при регулировании уровня воды в фильтре колебания уровня могут нежелательным образом сказаться на качестве от-

фильтрованной воды. Лучше настраивать регулятор на довольно широкую зону регулирования и получать при этом разницу в уровнях воды в промытом и загрязненном фильтрах, составляющую несколько сантиметров.

Точность, достигаемая при использовании пропорционально-интегрального закона регулирования, не зависит от диапазона зоны регулирования. Поскольку действие интегральной составляющей ПИ регулятора можно рассматривать как экспоненциальное (во времени) увеличение коэффициента усиления пропорционального регулятора на высокоинерционных объектах, этот закон регулирования может привести к неустойчивости системы.

Использовать ПИД закона регулирования (при котором корректирующее воздействие зависит от скорости изменения регулируемой величины) целесообразно для автоматического регулирования нестабильных объектов; их работа сопровождается кратковременными и довольно большими по амплитуде возмущениями. Например, при управлении термическим деаэратором можно использовать пропорциональный закон регулирования, чтобы поддерживать заданный уровень воды путем регулирования проходного сечения клапана на линии подачи воды, если вместимость сооружения достаточно велика по отношению к расходу воды. Что же касается давления, величина которого должна поддерживаться очень точно, то следует использовать ПИД закон регулирования, если возможны мгновенные изменения таких параметров процесса, как расход воды, ее температура и давление пара, либо ПИ закон регулирования, если в ходе процесса не возникает кратковременных интенсивных возмущений.

Применяя эти четыре закона регулирования в одноконтурной системе автоматического регулирования (САР), можно, как правило, решать проблемы, возникающие при очистке воды, хотя иногда требуется использовать многоконтурные САР. Это возможно в тех случаях, когда значение регулируемой величины зависит от нескольких изменяющихся параметров, каждый из которых имеет большое влияние на регулируемую величину. В таком случае при использовании любого из стандартных методов регулирования система теряет устойчивость и возникают незатухающие колебания. Например, на содержание свободного хлора C, которое следует поддерживать постоянным, при очистке воды с переменным расходом влияют три параметра: расход Q очищаемой воды, потребность в хлоре $Д$ и расход q от дозатора хлора, используемый в качестве регулирующей величины. Прежде всего задачу решают, поддерживая q пропорционально Q, а затем корректируют отклонение C от заданного значения. В случае высокоинерционного объекта задача может быть решена просто, с использованиме двухпозиционного регулирования. При этом, если коррекция осуществляется клапаном,

его открывают в течение заданного промежутка времени (время цикла) на время, пропорциональное Q, обеспечивая тем самым пропорциональность между Q и q; величину задания времени цикла автоматически корректируют, используя один из законов регулирования, причем выбор закона зависит от характера отклонения C от заданного значения.

Поскольку система, содержащая измерительное устройство, объект регулирования, исполнительный механизм и регулятор, замкнута, иногда необходимо использовать регуляторы с обратной связью, представляющие собой замкнутый контур, т. е. часть выходного сигнала регулятора, преобразованная элементами обратной связи, поступает на вход регулятора. При этом на входе регулятора суммируются сигнал, соответствующий регулируемой величине, и сигнал обратной связи. Системы с обратной связью, используемые, в частности, для регулирования уровней фильтра, повышает одновременно надежность и устойчивость САР.

19.2.3.2. Выбор регулятора. После того, как принято решение о наиболее приемлемом методе регулирования, возникает вопрос о том, на каких элементах, электроавтоматики или пневмоавтоматики, следует организовать систему регулирования. Основным элементом пневматических регуляторов служит стандартная система заслонка-сопло, действующая совместно с релейным усилителем мощности, который управляет исполнительным механизмом. Пневматические регуляторы легко обслуживать и просто ремонтировать. Ими часто пользуются по экономическим соображениям, особено при наличии доступного источника сжатого воздуха, и из соображений безопасности. Однако при необходимости их размещения на некотором расстоянии от объекта регулирования в процессе регулирования появляется дополнительное транспортное запаздывание, в ряде случаев недопустимое. Для устранения этой задержки используют электрическую линию связи, электропневматический преобразователь на входе регулятора и пневмоэлектрический преобразователь на его выходе. Введение двух преобразователей, естественно, снижает точность регулирования и не уменьшает в должной мере запаздывания, обусловленного пневматической линией связи.

При такой длине линии связи, когда запаздывание регулирующего сигнала оказывается несовместиммы с нормальной работой системы, используют электрические регуляторы. В том случае, если датчик, используемый для измерения регулируемой величины, выдает пневматический сигнал, его преобразуют в электрический с помощью пневмоэлектрического преобразователя, размещенного поблизости от датчика. Исполнительный механизм может быть электрическим либо системы пневмоавтоматики, если в этом есть необходимость или из экономических соображений, для чего управляющий сигнал преобразуется на

входе исполнительного механизма в пневматический и, при надобности, используется релейный усилитель мощности.

Здесь мы даем только общее представление о предмете автоматического регулирования. При автоматизации управления процессами очистки сточных вод на практике привлекаются специалисты, в полной мере изучившие техническую сторону вопроса.

19.3. АВТОМАТИЗАЦИЯ

19.3.1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Процессы очистки сточных вод и водоподготовки обычно включают ряд повторяющихся стадий. Автоматизация этих процессов имеет три основные цели: упростить управление очистными сооружениями, устранить ошибки оператора и получить экономический эффект за счет сокращения затрат рабочего времени.

19.3.2. ВИДЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Процессы водоподготовки, такие как промывка фильтра или регенерация деионизационной установки, могут быть автоматизированы в различной мере в зависимости от экономических факторов и допустимого риска ошибок оператора, возрастающего с повышением сложности процесса.

Существуют три варианта автоматизации управления: дистанционное ручное управление последовательонсти операций; дистанционное автоматическое управление последовательности операций с ручным запуском; автоматическое управление последовательности операций с автоматическим запуском. При использовании двух последних вариантов надежность оборудования может быть повышена за счет использования систем с «логической последовательностью».

Цель любого вида автоматизации последовательных операций — установить связь между операциями, осуществленными последовательно. При водоподготовке эти операции в основном состоят в закрывании или открывании электрически или пневматически управляемых клапанов, запуске или отключении насосов.

19.3.2.1. Дистанционное ручное управление. При дистанционном ручном управлении последовательностью операций переход от одной последовательности к другой (так же, как и запуск системы) полностью осуществляется оператором. Такая система может быть выполнена в виде многоканального пневматического распределителя. При этом оператор проверяет результаты одной последовательности действий, а затем переходит к следующей.

19.3.2.2. Автоматическое управление с ручным запуском системы. При этом виде автоматизации, хотя оператор отвечает за начало целой группы операций, переход от одной последовательности к другой осуществляется автоматически. В этих условиях вышеупомянутый распределитель может быть ообрудован пневмоприводом.

В другом варианте системы имеется набор соленоидных клапанов и пневматических реле. Последовательность операций в любой момент может быть прервана оператором и продолжена при дистанционном управлении. В функции оператора, который должен включить автоматическую последовательность операций, входит наблюдение за ходом процесса и принятие мер по устранению нарушений в работе системы автоматического управления.

19.3.2.3. Автоматическое управление с автоматическим запуском. Этот вид управления осуществляется от начала до конца без участия оператора. Нормальный ход технологического процесса «привязывается» к значениям одного или нескольких управляющих параметров, по достижении заданных значений которых происходит автоматическое включение системы. Поскольку при этом не требуется присутствия оператора, длительность безотказной работы технологического процесса определяется надежностью всей системы автоматического управления в целом.

Примером полностью автоматизированных систем могут служить фильтрующие установки, в которых сигнал о необходимости промывки фильтров поступает от датчиков, измеряющих потерю напора в фильтре, а также деминерализационные установки, которые автоматически переключаются на режим регенерации по показаниям датчиков, измеряющих параметры качества обессоленной воды (удельная электрическая проводимость, содержание кремниевой кислоты).

В таких системах автоматического управления максимальная надежность может быть достигнута при проведении всех операций в их логической последовательности с автоматической проверкой, получена ли на каждой последовательности выданная системой управления команда и проведено ли ее выполнение. При наличии отклонений от заданных условий автоматически прекращается работа системы до прихода оператора. При этом элементы исполнительных механизмов, такие, как клапаны или насосы, должны быть смонтированы совместно с управляющими устройствами, переводящими их в случае каких-либо нарушений в системе в одно из крайних, безопасных положений: открыто — закрыто (для клапанов) и включено — выключено (для насосов). Система автоматического управления может либо сигнализировать о наличии общего нарушения, либо автоматически обнаруживать и на дисплейном устройстве представлять элемент, ответственный за неисправность. Последний вари-

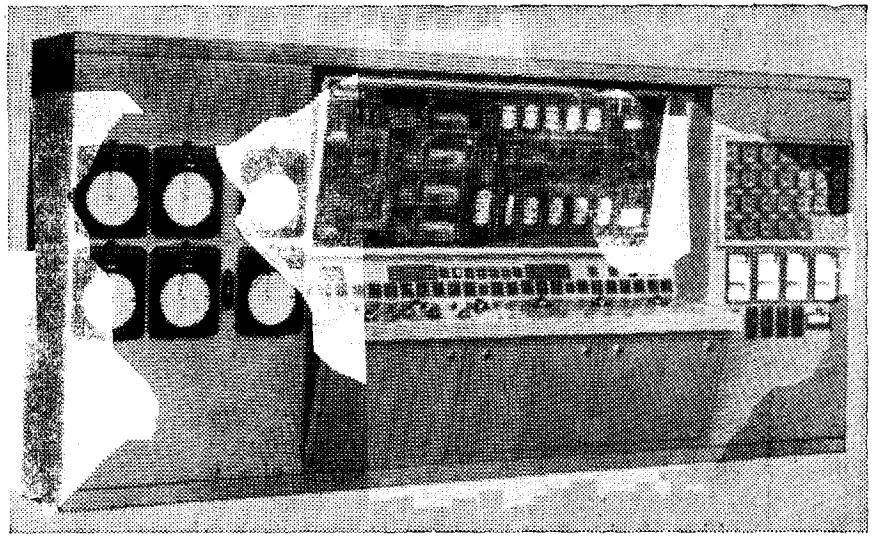


Рис. 19.19. Экопетрол. Нефтеочистительный завод в Колумбии. Мнемоническая схема

ант — наиболее интересный, так как повышает надежность автоматизированной системы, но следует отметить, что при этом значительно возрастает стоимость системы.

На практике для принятия решения, удовлетворительного с точек зрения надежности и экономичности одновременно, требуются совместные усилия специалистов по очистке воды и автоматизированным системам управления. Часто, например, простой самопишущий прибор расхода, фиксирующий расход в правильно выбранной точке, может быть использован для обнаружения определенных неисправностей. Аналогичным образом часовой механизм в комплекте с измерителем удельной электропроводности также может фиксировать возможное нарушение, если через определенный промежуток времени измерительный прибор не показывает ожидаемого результата.

19.3.3. СИСТЕМА АВТОМАТИЧЕСКОГО ПРОГРАММНОГО УПРАВЛЕНИЯ

Все современные промышленные предприятия оборудованы системами автоматического программного управления технологическими процессами и режимами работы машин и оборудования.

Элементы автоматики можно выбрать из чрезвычайно широкой номенклатуры — начиная от электромеханических элементов, далее с использованием бесконтактных устройств и вплоть

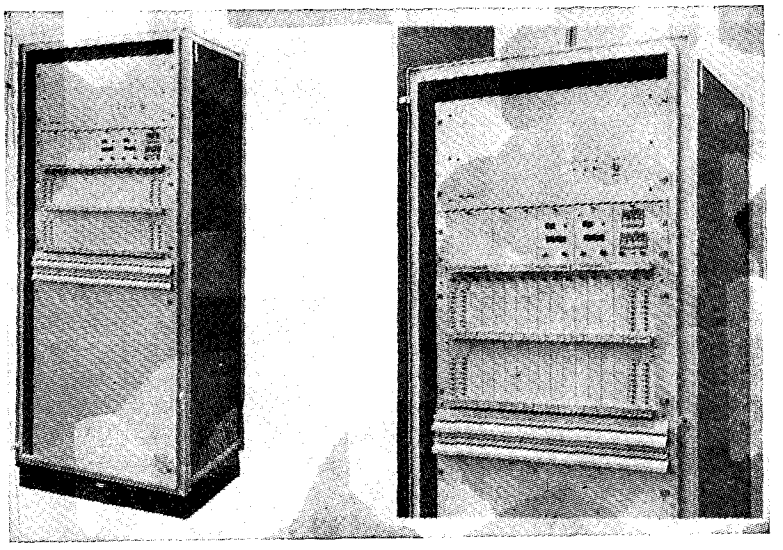


Рис. 19.20. Система автоматического программного управления

до систем, включающих линии ЭВМ. Система автоматического программного управления является одной из таких систем. Она полностью состоит из бесконтактного оборудования, способного осуществлять те же функции, что и логические схемы на электромеханических или бесконтактных релейных элементах.

Основная особенность рассматриваемой системы состоит в том, что она действует по заданной программе, т. е. все функциональные зависимости и последовательность операций, необходимые для контроля и управления процессом, хранятся в памяти машины.

Система автоматического программного управления содержит:

- модули ввода и вывода информации, число которых может быть различным в каждой из систем, но обычно не превышает нескольких сотен;
- центральный процессор, в функции которого входит управление устройствами ввода и вывода и выполнение программы, хранящейся в памяти машины; причем объем памяти в зависимости от сложности программы обычно может быть увеличен;
- источник постоянного тока, необходимый для питания системы.

Напряжения питания отдельных блоков стабилизированы, и колебания сетевого напряжения на них влияния не оказывают.

Характерная особенность системы автоматического программного управления — использование очень простого языка программирования, построенного на кодировании электрических

сигналов или на логических символах. Все функции, выполняемые системой, запрограммированы (логические действия, отсчет времени, вычисления, смещение информации и т. д.).

В области водоподготовки системы программного автоматического управления целесообразно использовать для промывки фильтров или регенерации деионизационных установок.

В большинстве случаев при использовании таких систем число необходимых логических операций довольно ограничено. Большое количество последовательностей является функцией только времени. С учетом этого фирма «Дегремон» разработала систему, в которой и длительность последовательностей, и управление вводом или выводом операций могут быть заложены в программу.

19.3.4. ОБРАБОТКА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ДАННЫХ

Несмотря на то, что значительное количество автоматизированных систем, используемых при водоподготовке, является не чем иным, как своего рода логическими системами, аналогичными системе, описанной ранее в этой главе, определенный прогресс может быть обеспечен при использовании ЭВМ для обработки данных (в ряде случаев стоимости таких машин довольно низкие).

ЭВМ также полезно использовать для управления процессами, в том числе супервизорного управления, как и собственно для автоматизации. В их функции может входить:

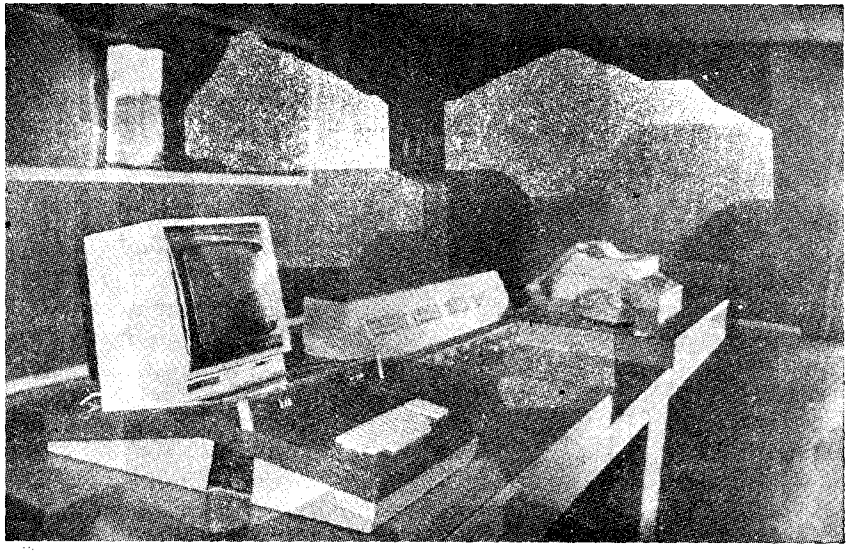


Рис. 19.21. Центральный пульт управления станции очистки сточных вод с территории г. Бордо, Франция

централизованный сбор информации и контроль характеристик работы станции;

расчет параметров, влияющих на работу станции;

возможность печати данных, полученных в период времени до того, как произошло расследуемое событие, для чего требуется проверка данных;

выполнение и хранение управляющей программы.

При автоматизации процесса использование ЭВМ имеет следующие достоинства: обеспечивается большая гибкость при компиляции программ; возможность оптимизации процессов; объединяются функции нескольких систем автоматического регулирования рядом процессов.

Реализация этих достоинств может быть осуществлена на крупных станциях, на которых требуется определенный уровень использования вычислительных средств. Развитие новых мини-ЭВМ и программных регуляторов означает, что теперь появляется возможность найти правильное решение для автоматизации станции любого типа.

Элементы периферийной аппаратуры ЭВМ включают: печатающие устройства, пульт, дисплейное устройство, панель для связи с ЭВМ и т. д., а также линии связи с устройствами памяти, центральным процессором, устройствами ввода и вывода и т. д. Программное обеспечение предусматривает трансляцию на язык ЭВМ входной программы, проведение вычислений, считывание данных и команд.

В каждом случае потенциальные достоинства ЭВМ следует оценивать, исходя из надежности и точности используемых датчиков технологических параметров (особенно при очистке сточных вод). Если ЭВМ собираются использовать для управления процессами очистки в реальном масштабе времени, достоинства, которые предполагают при этом извлечь, могут быть лимитированы малыми скоростями процессов, как, например, в случае биологической очистки. Если ЭВМ используют для управления крупномасштабными автоматизированными системами, отмечается тенденция к использованию иерархического метода цифрового управления, при котором управление элементами станции и параметрами процессов осуществляют регулирующими устройствами, способными функционировать независимо от центрального процессора. Из этого следует, что необходимо уделять должное внимание разработке интерфейсов.

Во всех случаях ЭВМ является очень полезной для технического руководителя системой. Машина способна объединять значительный объем данных, но не должна быть перегружена. Она делает возможным использование современного оборудования для контроля отдельной совокупности операций, работы элементов станции и технологических параметров (в частности, при использовании цветной телепередачи).

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ
ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ ФИРМЫ «ДЕГРЕМОН» К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

ЧАСТЬ ПЕРВАЯ. ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О ВОДЕ И МЕТОДАХ ОБРАБОТКИ ВОДЫ

1. Вода: физика, химия, биология

1.1. Вода и ее физические характеристики 10
1.1.1. Молекула воды 10
1.1.2. Три состояния 11
1.1.3. Физические свойства 11
1.2. Вода и химия 13
1.2.1. Вода как растворитель 13
1.2.2. Окисление — восстановление (окислительно-восстановительные реакции) 20
1.3. Вода и биология 21
1.3.1. Вода и клеточный метаболизм 21
1.3.2. Вода — среда для жизни микробов 23
1.3.3. Питательные вещества 25

2. Действие воды на материалы 26

2.1. Механизм электрохимической коррозии железа 26
2.1.1. Электрохимические процессы 26
2.1.2. Коррозия в среде, не содержащей растворенный кислород (водородная коррозия) 28
2.1.3. Кислородная коррозия 30
2.2. Действие углекислоты 32
2.2.1. Углекислотное равновесие, агрессивность по отношению к $CaCO_3$ 32
2.2.2. Общие представления о равновесии 33
2.2.3. Графическое выражение 33
2.3. Образование защитных пленок и пассивация 36
2.3.1. Образование естественных защитных пленок 36
2.3.2. Ингибирование и пассивация 38
2.3.3. Способы защиты от коррозии 38
2.3.4. Катодная защита 39
2.4. Влияние вторичных факторов на коррозию 40
2.4.1. Солесодержание воды (сульфаты и т. д.) 40
2.4.2. Температура воды, содержащей растворенный кислород 42
2.4.3. Микроорганизмы (см. бактериальное окисление-восстановление 42
2.4.4. Состояние поверхности и качество воды 44
2.4.5. Значение pH 44
2.4.6. Скорость потока 45
2.5. Коррозия нержавеющей стали 45
2.5.1. Определения 45
2.5.2. Коррозия нержавеющих сталей в жидкой среде 47
2.5.3. Виды коррозии нержавеющей стали 47
2.5.4. Применение нержавеющих сталей 50
2.5.5. Выбор нержавеющей стали 50
2.6. Разрушение бетона 51
2.6.1. Механическое разрушение бетона 51
2.6.2. Химическое разрушение бетона 52
2.7. Коррозия цветных металлов 55
2.7.1. Алюминий 55
2.7.2. Медь 56
2.7.3. Свинец 56
2.7.4. Оцинкованные стали 56
2.7.5. Латуни 57
2.8. Действие морской воды 58
2.8.1. Коррозионная активность и образование отложений 58
2.8.2. Защита против образования отложений 58
2.8.3. Защита от коррозии 59
2.8.4. Защита от органических обрастаний 59

3. Теория основных процессов обработки

3.1. Физико-химические процессы 61
3.1.1. Удаление взвешенных и коллоидных веществ 61
3.1.2. Удаление растворенных веществ 86
3.1.3. Разделение жидкостей 96
3.1.4. Химические процессы 97
3.2. Биологические процессы 100
3.2.1. Рост бактериальной культуры 101
3.2.2. Оценка степени загрязненности воды органическими веществами 102
3.2.3. Аэробная обработка 104
3.2.4. Анаэробная обработка: сбраживание 109
3.2.5. Бактериальное окисление — восстановление 110

ЧАСТЬ ВТОРАЯ. ПРОЦЕССЫ ОЧИСТКИ И ОЧИСТНЫЕ СТАНЦИИ

4. Предварительная обработка 115

4.1. Процеживание 115
4.1.1. Типы стержневых решеток 116
4.1.2. Автоматический контроль и защита механических решеток 119
4.1.3. Скорости потока и потери напора. Загрязнение решетки 120
4.2. Дробление отбросов 120
4.2.1. Комминюторы на самотечных линиях 121
4.2.2. Комминюторы — насосы 122
4.3. Удаление песка 123
4.3.1. Водопроводные станции 124
4.3.2. Канализационные очистные станции 124
4.3.3. Песколовки для производственных стоков 126
4.4. Предварительная обработка воды из поверхностных источников 127
4.5. Удаление нефти и жиров 128
4.5.1. Удаление нефти из поверхностных вод 129
4.5.2. Удаление жиров из сточных вод перед сбросом их в канализационную сеть 129
4.5.3. Удаление жиров как предварительная обработка на станциях очистки бытовых стоков 130
4.5.4. Предварительное удаление нефти из сточных вод нефтеочистительных, нефтехимических и других промышленных предприятий 131
4.6. Тонкое процеживание 133
4.6.1. Вращающиеся макросита 134
4.6.2. Сита с фиксированным скребком 135
4.6.3. Неподвижные или вращающиеся самоочищающиеся сита 135
4.6.4. Механические фильтры 136
4.7. Удаление и обработка песка и отбросов, выделенных из сточных вод 137
4.7.1. Отбросы с решеток 137
4.7.2. Песок из песколовок 137
4.7.3. Жиры и пена 138

5. Коагуляция и флокуляция в технологии очистки воды 139

5.1. Общие сведения 139
5.2. Коагуляция 140

5.2.1. Основные коагулянты 140
5.2.2. Коагуляционная обработка воды 143
5.3. Флокуляция 144
5.3.1. Флокулянты 144
5.3.2. Флокуляция 148

6. Химическое осаждение 149

6.1. Основы процессов осаждения 149
6.1.1. Выделения кальция и магния 149
6.1.2. Удаление кремния 153
6.1.3. Удаление солей из металлсодержащих стоков путем обработки осаждением 154
6.1.4. Обработка рассолов 154
6.1.5. Осаждение гидроксидов металлов 156
6.2. Оборудование для осаждения 157
6.2.1. Осаждение кальция и магния на холоду 157
6.2.2. «Термоциркулятор» для удаления карбонатов и кремния при нагревании 159

7. Отстаивание. Флотация 161

7.1. Основные виды отстаивания 161
7.1.1. Статическое отстаивание 161
7.1.2. Осветление в условиях контакта с осадком 162
7.1.3. Применение тонкослойного отстаивания в осветлителях со взвешенным слоем осадка 163
7.1.4. Сверхускоренное осветление 164
7.2. Отстойники 165
7.2.1. Статические отстойники 166
7.2.2. Сооружения для отстаивания при контакте с осадком 174
7.2.3. Вспомогательное оборудование для отстойников 185
7.3. Флотация 190
7.3.1. Основные системы флотации 190
7.4. Флотаторы 197
7.4.1. Общая технология 197
7.4.2. «Флотазер В» 200
7.4.3. «Седифлотазер» 200
7.4.4. «Седифлотор» 202
7.4.5. «Флотазер *R*» 203

8. Аэробные биологические процессы 203

8.1. Биологические фильтры 203
8.1.1. Теоретические представления 204
8.1.2. Биофильтры с обычной загрузкой 205
8.1.3. Биофильтры с пластмассовой загрузкой 208
8.1.4. Проблемы эксплуатации биофильтров 211
8.2. Процессы очистки воды с активным илом 212
8.2.1. Нагрузка 212
8.2.2. Основные системы с активным илом 215
8.2.3. Системы аэрации 222
8.3. Способность сточных вод обрабатываться биологическим путем 232
8.3.1. Лабораторная установка 233
8.3.2. Манометрические методы—респирометры 234
8.4. Контроль биологических процессов 236

8.4.1. Цель контроля 236
8.4.2. Сущность контроля 237
8.4.3. Области применения методов контроля 240

9. Фильтрование воды 244

9.1. Общие положения 244
9.1.1. Механизмы фильтрования 245
9.1.1.1. Механизмы отложения (245). — 9.1.1.2. Механизмы фиксации (246). — 9.1.1.3. Механизмы отрыва (246).
9.1.2. Загрязнение и промывка фильтрующих материалов 246
9.1.3. Выбор методов фильтрования 247
9.2. Поверхностное фильтрование 247
9.2.1. Фильтрование через сетчатые перегородки 247
9.2.1.1. Микрофильтрование при атмосферном давлении (248). — 9.2.1.2. Микрофильтрование под давлением (249).
9.2.2. Фильтрование через пористые материалы большой толщины 250
9.2.3. Фильтрование через пористые материалы с намывным слоем 251
9.2.3.1. Трубчатые фильтры (251). — 9.2.3.2. Дисковые или тарельчатые фильтры (254).
9.3. Фильтрование через зернистые фильтрующие загрузки 254
9.3.1. Общие положения 254
9.3.2. Медленное фильтрование 256
9.3.3. Скорое фильтрование 257
9.3.3.1. Основные способы (257). — 9.3.3.2. Фильтрующая загрузка (260). — 9.3.3.3. Использование зернистой загрузки ( ).
9.3.4. Промывка 272
9.3.4.1. Методы промывки (272). — 9.3.4.2. Частота промывок (274). — 9.3.4.3. Потребление воды для промывки (274). — 9.3.4.4. Выбор типа дренажных колпачков для промывки скорых фильтров (274). — 9.3.4.5. Количество взвешенных веществ, которое можно удалять фильтрованием (276).
9.4. Напорное фильтрование 277
9.4.1. Вертикальные фильтры, промываемые только водой 277
9.4.2. Вертикальные фильтры с промывкой воздухом и водой 278
9.4.2.1. Фильтры с одним однородным слоем с промывкой одновременно воздухом и водой (278). — 9.4.2.2. Однослойные и двухслойные фильтры с промывкой последовательно воздухом и водой (279). 9.4.2.3. Ультраскорые двухслойные фильтры (IHR). — (280) 9.4.2.4. Двойные и тройные колонны (281). — 9.4.2.5. Двухпоточные фильтры типа 2*F*. (282).
9.4.3. Горизонтальные фильтры с водовоздушной промывкой 285
9.5. Открытые фильтры 286
9.5.1. Скорые фильтры со скоростью фильтрования от 5 до 10 м/ч 286
9.5.1.1. Фильтры с одним однородным слоем типа «Аквазер Ти№» (286). — 9.5.1.2. Фильтры «Медиазер» типа Т и № с однослойной или двухслойной загрузкой и с последовательной промывкой воздухом и водой (292). — 9.5.1.3. Фильтры типа «Медиазер G» с каналами небольших размеров, однослойной фильтрующей загрузкой, с последовательской промывкой воздухом и водой (293).
9.5.2. Высокоскоростные фильтры со скоростью фильтрования от 7 до 20 м/ч 293
9.5.2.1. Фильтры типа «Аквазер V» с одним слоем, который остается однородным после промывки (293). — 9.5.2.2. Однослойные и многослойные фильтры «Медиазер» типа V с последовательной промывкой воздухом и водой (297). — 9.5.2.3. Фильтры «Медиазер GH» с каналами малых размеров, однослойной загрузкой, промывкой последовательно воздухом и водой (299). — 9.5.2.4. Двухпоточные открытые фильтры типа D2F (300).
9.5.3. Беззадвижечные самопромывающиеся фильтры с автоматическим сифоном 300
9.5.4. Сухие фильтры 302
9.6. Управление фильтрами 303
9.6.1. Фильтры с переменным уровнем и постоянным расходом воды 303

9.6.2. Фильтры постоянного расхода с компенсацией забивания загрузки 304
9.6.2.1. Гидравлический регулятор (304). — 9.6.2.2. Электронный регулятор (306). — 9.6.2.3. Управление батареей фильтров (307).
9.6.3. Фильтры без равномерного распределения воды и индивидуального регулирования (с переменной скоростью фильтрования) 312
9.7. Контроль за работой и автоматизация фильтров 315
9.7.1. Оборудование для непрерывного контроля 315
9.7.2. Автоматизация 316

10. Ионный обмен 317

10.1. Свойства ионообменных материалов 317
10.2 Словарь по ионообмену 318
10.3. Ионообменные материалы 319
10.3.1. Катионообменные материалы 319
10.3.2. Анионообменные материалы 321
10.4. Использование ионообменных материалов 323
10.4.1. Неподвижная загрузка с направлением потока при регенерации сверху вниз 323
10.4.1.1. Умягчение (324). — 10.4.1.2. Удаление карбонатов ионообменными смолами (325). — 10.4.1.3. Полное обессоливание (325).
10.4.2. Регенерация обратным потоком. Использование стратифицированных загрузок 332
10.4.2.1. Удержание загрузки инжектированием воды (332). — 10.4.2.2. Механическое удержание загрузки (333). — 10.4.2.3. Удержание загрузки с помощью инжектирования или отсоса воздуха (334). — 10.4.2.4. Использование многослойных загрузок (334).
10.4.3. Установки со смешанной загрузкой 336
10.4.4. Процессы ионообмена в движущейся загрузке 338
10.5. Контроль и дополнительная обработка 342
10.5.1. Контроль работы обессоливающих установок 342
10.5.2. Удаление органических веществ смолами — адсорбентами 343
10.5.3. Дезинфекция ионообменных материалов 344

11. Адсорбция и адсорбенты 345

11.1. Основные адсорбенты 345
11.1.1. Активный уголь 345
11.1.2. Другие адсорбенты 346
11.2. Использование активного угля 347
11.2.1. Порошкообразный уголь 347
11.2.1.1. Преимущества (348). — 11.2.1.2. Недостатки (348).
11.2.2. Гранулированный уголь 349
11.2.2.1. Характеристики (349). — 11.2.2.2. Технология очистки фильтрованием через загрузку из гранулированного активного угля (349). — 11.2.2.3. Адсорбционная емкость угля (350). — 11.2.2.4. Регенерация (351).
11.2.3. Совместное использование порошкообразного и гранулированного углей 352
11.2.4. Область применения 353

12. Мембранная сепарация 353

12.1. Обратный осмос 353
12.1.1. Осмос и обратный осмос 353
12.1.2. Обратноосмотические мембраны 355
12.1.2.1. Спиральнонавитые модули (356). — 12.1.2.2. Модули из полых волокон (356)
12.1.3. Обратноосмотические установки 359
12.1.4. Область применения обратного осмоса 361
12.1.4.1. Снабжение питьевой и технологической водой потребителей, водные ресурсы которых ограничены солоноватой водой (361). — 12.1.4.2. Получение ультрачистой воды (362). — 12.1.4.3. Обессоливание морской воды (363). — 12.1.4.4. Обработка промышленных сточных вод (363). — 12.1.4.5. Улучшение качества воды, очищенной на традиционых очистных установках (364). 364
12.2. Ультрафильтрация 364
12.2.1. Общие положения 365
12.2.2. Ультрафильтры 366
12.2.3. Область применения 366
12.3. Электродиализ 370

13. Массообмен между газом и жидкостью 370

13.1. Основные положения теории газожидкостного массообмена 372
13.2. Оборудование для газожидкостного массообмена 372
13.2.1. Статические аэраторы и смесители
13.2.1.1. Разбрызгивание (373). — 13.2.1.2. Разбрызгивание воды в воздухе (373). — 13.2.1.3. Просачивание сквозь контактную загрузку — биологические фильтры (374). — 13.2.1.4. Барботаж в глубоких резервуарах (374). — 13.2.1.5. Барботаж при малой глубине воды (375). — 13.2.1.6. Распределение газов (диспергирование вдуваемых газов: воздуха, O_2, O_3) (375). 376
13.2.2. Механические аэраторы и смесители 376
13.2.3. Напорные аэраторы 377
13.2.4. Диаэраторы для отдувки газов
13.2.4.1. Установки для удаления CO_2 (378). — 13.2.4.2. Отгонка паром (удаление аммиака) (379). 379
13.2.5. Термические деаэраторы
13.2.5.1. Деаэратор «Дегремон» (380). — 13.2.5.2. Куполообразный деаэратор, устанавливаемый в резервуаре (382). — 13.2.5.3. Вертикальный деаэратор (383). 383
13.2.6. Вакуумный дегазатор 386
13.2.7. Комбинированные дегазаторы 386

14. Химическая корректировка свойств воды и кондиционирование 387

14.1. Область применения процессов корректировки и кондиционирования 387
14.1.1. Предотвращение коррозии
14.1.1.1. Питьевой водопровод и различные производственные системы (387). — 14.1.1.2. Вода для питания котлов и теплообменных аппаратов (388). 388
14.1.2. Предотвращение образования отложений 388
14.1.3. Борьба с биологическими обрастаниями 388
14.1.4. Нейтрализация различных стоков 389
14.2. Основные процессы 389
14.2.1. Корректировка pH (нейтрализация)
14.2.1.1. Применение щелочных реагентов (389). — 14.2.1.2. Фильтрование через нейтрализующие зернистые материалы (390). — 14.2.1.3. Подкисление воды (392). — 14.2.1.4. Взаимная нейтрализация (392). 392
14.2.2. Обогащение воды солями 394
14.2.3. Предотвращение образования отложений 397
14.2.4. Обескислороживание 398
14.2.5. Ингибиторы коррозии
14.2.5.1. Простые ингибиторы (398). — 14.2.5.2. Сложные ингибиторы (400). 401
14.2.6. Применение различных реагентов
14.2.6.1. Биоцидные реагенты (401). — 14.2.6.2. Реагенты для очистки труб (402). 403

15. Окисление и дезинфекция 403

15.1. Окисление и дезинфекция хлором 403
15.1.1. Действие хлора 605

15.1.2. Применение хлора 404
15.1.2.1. Предварительное хлорирование (точка перелома) (404). — 15.1.2.2. Дезинфекция питьевой воды (405). — 15.1.2.3. Контроль расхода газообразного хлора и хранение жидкого хлора (406).
15.2. Окисление и обеззараживание производными хлора
15.2.1. Хлорамины 407
15.2.2. Диоксид хлора 407
15.2.3. Гипохлорит натрия 407
15.3. Электрохимическое хлорирование 409
15.3.1. Принцип метода 410
15.3.2. Конструкция электролизера 410
15.3.3. Условия эксплуатации 411
15.4. Окисление и дезинфекция озоном 411
15.4.1. Свойства и получение озона 412
15.4.1.1. Физические свойства (412). — 15.4.1.2. Принцип получения озона (412). — 15.4.1.3. Типы озонаторов (413). — 15.4.1.4. Технология получения озона (414).
15.4.2. Применение озона 421
15.4.2.1. Принцип (421). — 15.4.2.2. Контакт озона с водой (423). — 15.4.2.3. Деструкция остаточного озона (424). — 15.4.2.4. Меры предосторожности при использовании озона (426). — 15.4.2.5. Методы определения озона (426).
15.5. Другие методы окисления и обеззараживания
15.5.1. Использование перманганата калия 427
15.5.2. Применение брома 427
15.5.3. Применение смеси хлора и брома 427
15.5.4. Дезинфекция с помощью ультрафиолетового облучения 428
15.5.5. Дезинфекция серебром 428
15.5.6. Дезинфекция ионизирующей радиацией 429

16. Основные свойства, стабилизация, уплотнение и кондиционирование осадков 429

16.1. Источники образования осадков и их характеристика
16.1.1. Классификация 429
16.1.2. Факторы, характеризующие природу осадков 430
16.1.3. Факторы, характеризующие структуру осадков 433
16.1.4. Факторы, обусловливающие поведение осадка в процессе обезвоживания 434
16.2. Конечное назначение осадка. Полупродукты 435
16.3. Цель обработки осадка и применяемые методы 436
16.4. Стабилизация осадка 439
16.4.1. Анаэробное сбраживание 441
16.4.1.1. Образование газа, температура и время сбраживания (441). — 16.4.1.2. Параметры, влияющие на эффективность анаэробного сбраживания (442). — 16.4.1.3. Результаты сбраживания (443). — 16.4.1.4. Одно- или двухступенчатое сбраживание. Принципы проектирования (445). — 16.4.1.5. Проектирование метантенков (446). — 16.4.1.6. Пуск и эксплуатация метантенков (452).
16.4.2. Аэробная стабилизация осадка 454
16.4.2.1. Анаэробное сбраживание и аэробная стабилизация (454). — 16.4.2.2. Критерии оценки хорошей стабилизации (456). — 16.4.2.3. Проектирование стабилизаторов осадка (456). — 16.4.2.4. Технология аэробной стабилизации (458).
16.4.3. Химическая стабилизация осадка
16.4.4. Пастеризация 459
16.4.5. Облучение 460
16.5. Уплотнение осадка 461
16.5.1. Отстаивание 461
16.5.1.1. Уплотнители без скребковых механизмов (464). — 16.5.1.2. Механизированные илоуплотнители (464). — 16.5.1.3. Эксплуатация уплотнителей (465).
16.5.2. Отмучивание 462
16.5.3. Флотация 466
16.6. Кондиционирование осадков 467
16.6.1. Химическое кондиционирование 470
16.6.1.1. Неорганические реагенты (471). — 16.6.1.2. Полиэлектролиты (474).
16.6.2. Тепловое кондиционирование 471
16.6.2.1. Тепловая обработка осадка (476). — 16.6.2.2. Технология тепловой обработки осадка (479). — 16.6.2.3. Мокрое сжигание (480).
16.6.3. Другие методы кондиционирования 476
16.6.3.1. Замораживание (481). — 16.6.3.2. Кондиционирование с помощью растворителей (482).

17. Обезвоживание, сушка и сжигание осадков 481

17.1. Обезвоживание 483
17.1.1. Фильтрование 483
17.1.1.1. Характеристика фильтруемости (483) — 17.1.1.2. Иловые площадки (486). — 17.1.1.3. Фильтрующие мешки (489). — 17.1.1.4. Вакуум — фильтрование (489).
17.1.1.5. Ленточные пресс-фильтры (497). — 17 1.1.6. Фильтрование под давлением (503). — 17.1.1.7. Автоматизированная тонкослойная фильтрация под давлением (512). — 17.1.1.8. Непрерывное прессование (512).
17.1.2. Разделение в центробежном поле 483
17.1.2.1. Центрифугируемость. Центрифугирование (513) — 17.1.2.2. Осадительные центрифуги непрерывного действия (514). — 17.1.2.3. Ускоренное уплотнение осадка центрифугированием (521).
17.1.3. Передвижные обезвоживающие установки 513
17.2. Сушка и сжигание 523
17.2.1. Тепловой баланс 523
17.2.2. Основные элементы установок, предназначенных для сушки и сжигания газов 525
17.2.3. Фазы сушки и способы проведения процесса 526
17.2.4. Основные типы печей 526
17.2.4.1. Многоподовые печи (528). — 17.2.4.2. Вращающиеся печи (530) — 17.2.4.3. Печи с псевдоожиженным слоем (531). — 17.2.4.4. Сушилки мгновенного действия (534).
17.2.5. Пиролиз 528
17.2.6. Обработка дымовых газов 534
17.2.7. Осадок и домашний мусор 534

18. Хранение и дозирование реагентов 536

18.1. Основные реагенты, применяемые при очистке воды 537
18.1.1. Специальные реагенты 537
18.1.2. Реагенты общего назначения 537
18.2. Хранение реагентов 542
18.2.1. Хранение реагентов в порошкообразном виде 544
18.2.2. Хранение жидких реагентов 544
18.2.3. Хранение газообразных реагентов 546
18.3. Приготовление растворов и суспензий 547
18.4. Дозирование реагентов 548
18.4.1. Подача растворов и суспензий 550
18.4.1.1. Дозирование поршневыми насосами-дозаторами (550). — 18.4.1.2. Гравитационные дозаторы (552). 18.4.1.3. Дозаторы вытеснительного типа (555).
18.4.2. Измерение и дозирование сухих реагентов в порошкообразном виде 550
18.4.2.1. Объемные дозаторы (557). — 18.4.2.2. Гравиметрические дозаторы (559).
18.4.3. Дозирование газообразных реагентов 557
18.4.3.1. Подача хлора к дозирующему оборудованию (562). — 18.4.3.2. Хлораторы, работающие под вакуумом (564).
18.4.4. Регулирование расхода реагента по расходу воды и значению физико-химического параметра 562

19. Измерения, контроль, управление и автоматизация 568

19.1. Автоматическое измерение и контроль при очистке воды 568

19.1.1. Введение 568

19.1.2. Измерение и автоматический контроль общих параметров 571

19.1.2.1. Измерение расходов (571). — 19.1.2.2. Методы измерения уровней жидкости (572). — 19.1.2.3. Измерение потерь напора (573). — 19.1.2.4. Измерение температуры воды (574).

19.1.3. Автоматическое измерение и контроль параметров состава воды 574

19.1.3.1. Автоматические методы физических измерений (574). — 19.1.3.2. Автоматические методы химических анализов (584). — 19.1.3.3. Станция автоматического контроля (585). — 19.1.3.4. Биотесты с использованием рыб (586).

19.2. Автоматическое регулирование 587

19.2.1. Общие принципы 587

19.2.2. Четыре способа регулирования 588

19.2.2.1. Двухпозиционное регулирование типа «включено — выключено» (588). — 19.2.2.2. Использование пропорционального (П) закона регулирования (588). — 19.2.2.3. Использование интегрального (И) закона регулирования (589). — 19.2.2.4. Дифференциальный (Д) закон регулирования (590).

19.2.3. Выбор метода регулирования 591

19.2.3.1. Выбор закона регулирования (591). — 19.2.3.2. Выбор регулятора (593).

19.3. Автоматизация 594

19.3.1. Общие положения 594

19.3.2. Виды автоматического управления 594

19.3.2.1. Дистанционное ручное управление (594). — 19.3.2.2. Автоматическое управление с ручным запуском системы (595). — 19.3.2.3. Автоматическое управление с автоматическим запуском (595).

19.3.3. Система автоматического программного управления 596

19.3.4. Обработка производственных данных 598

«ДЕГРЕМОН»

Кристиан Барраке (Christian Barraqué) Жон Бебен (Jean Bébin), Жак Бернар (Jacques Bernard), Франсуа Берне (Francois Bernê), Жан Бушар (Jean Bouchard), Даниель Бургиня (Daniel Bourguignat), Жан Дюро (Jean Durot), Рене Фламион (Renée Flamion), Ги Фромон (Guy Fronvont), Андре Обри (André Haubry), Радю Олька (Radu Holca), Жак Лемер (Jacques Lemaire), Робер Любутэн (Robert Louboutin), Жан Мармане (Jean Marmagne), Жан Миньо (Jean Mignot) Пьер Муше (Pierre Mouchet), Морис Паре (Maurice Parê), Бернар Рольт (Bernard Rault), Ив Ришар (Ives Richard), Жан—Мари Ровель (Jean—Marie Rovel), Винсент Савваль (Vincent Savall), Жак Тардивель (Jacques Tardivel), Андре Тишит (André Tichit), Пьер Трей (Pierre Treille), Жак Бешо (Jacques Bêchaux)

ТЕХНИЧЕСКИЕ ЗАПИСКИ ПО ПРОБЛЕМАМ ВОДЫ

Том 1

Редакция переводных изданий
Зав. редакцией *М. В. Перевалюк*
Редакторы *М. Н. Кузнецова, Т. В. Рютина*
Младший редактор *Л. Г. Беглецова*
Технический редактор *В. Д. Павлова*
Корректор *Е. А. Степанова*

ИБ № 2650

Сдано в набор 25.09.82. Подписано в печать 31.12.82.

Формат 60×90¹/₁₆. Бумага типографская № 1. Гарнитура «Литературная»
Печать высокая Печ. л. 38,0 Усл. кр.-отт. 38,0 Уч. изд. л. 38,61 Тираж 6500 экз.
Изд. № АХ-9257 Заказ 1230 Цена 3 руб.

Стройиздат
101442, Москва, Каляевская, 23а

Московская типография № 4 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли
129041, Москва, Б. Переяславская ул., д. 46.