

Защита водного бассейна

4.1. Общие вопросы водоснабжения

Водоснабжение населенных мест, промышленных, транспортных и сельскохозяйственных предприятий является одной из важнейших народнохозяйственных задач. Комплекс сооружений, осуществляющих водоснабжение, т.е. получение воды из природных источников, ее очистку, транспортирование и подачу потребителю, называется *системой водоснабжения* или *водоотводом* (*водообеспечением*).

Первые сведения об искусственных сооружениях для добывания воды относятся к колодцам, строившимся еще за 3 тыс. лет до н.э. (Египет, Китай). Современные системы водоснабжения представляют собой сложный комплекс разнообразных устройств, обеспечивающих требуемое количество воды надлежащего качества. Обычно они включают следующие сооружения:

- водоприемные, при помощи которых вода забирается из природных источников;

- водоподъемные (насосные станции), подающие воду по трубам к местам ее очистки, хранения или потребления;

- очистные;

- водоводы и сети труб для подачи воды к местам ее потребления;

- башни и резервуары для создания запасов воды или регулирования напоров и расходов.

Общая схема водоснабжения сводится к следующему (рис. 4.1). Вода после забора из источника при помощи водоприемного сооружения 1 подается насосами первого подъема, установленными на станции 2а, к очистным сооружениям 3. После них она поступает в сборный резервуар 4, из которого насосами второго подъема станции 2б по водоводам 5 перекачивается в сеть труб 6, разводящих воду к местам потребления.

В зависимости от местных природных условий, характера потребления воды, по ряду экономических соображений представленная схема водоснабжения и составляющие ее элементы могут существенно измениться. Так, водонапорную башню 7 располагают в начале сети, в конце или в какой-либо ее промежуточной точке. Насосы первого и второго подъема размещают в отдельных зданиях или объединяют в одном строении. Иногда насосы первого подъема устанавливают непосредственно в водоприемных сооружениях. В некоторых случаях очи-

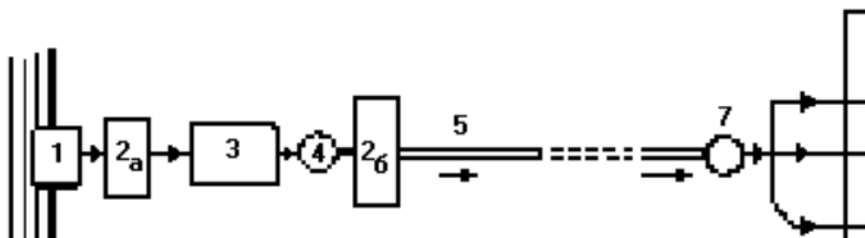


Рис. 4.1. Общая схема водоснабжения

стой комплекс и связанные с ним резервуар и насосную станцию второго подъема строят не возле источника, а вблизи потребителя воды (город, поселок, промышленное предприятие и т.д.).

В качестве источника водоснабжения используют открытые водоемы (реки, озера, пруды), подземные источники (грунтовые и артезианские воды, родники), в некоторых случаях — моря.

Характер источника влияет на всю схему водоснабжения в целом. В частности, сопоставление качества воды данного источника и требований потребителя определяет необходимые степень и способы очистки воды. Так, к воде для хозяйственно-питьевых нужд прежде всего предъявляют требования санитарно-гигиенического порядка. Она должна быть безвредной и прозрачной, не содержать болезнетворных бактерий, не иметь запахов и дурных привкусов. Нередко таким требованиям удовлетворяет вода подземных источников, которая в этом случае подается потребителю без очистки. Вода открытых водоемов часто мутна, загрязнена поверхностными стоками, значительным количеством бактерий, т.е. неудовлетворительна в санитарном отношении и при использовании для хозяйственно-питьевых целей нуждается в предварительной очистке.

При водоснабжении промышленных предприятий в ряде случаев также необходимо предварительное улучшение качества воды (снижение ее жесткости, мутности и т.п.).

Водоснабжение крупных объектов нередко осуществляется от нескольких источников, например открытых и подземных. Если объекты расположены в маловодной местности, то иногда приходится использовать весьма отдаленные источники и подавать воду на десятки и даже сотни километров.

Источники водозабора должны защищаться зоной санитарной охраны, которая делится на три пояса (СанПиН 2.1.4.027-95).

В первом (зона строгого режима) запрещено проживание и временное нахождение лиц, не связанных с работой на водопроводных

сооружениях, а также строительство, за исключением востребованного техническими нуждами самого водопровода.

Второй пояс (зона ограничения) охватывает территорию, непосредственно окружающую источники водоснабжения и их притоки. В этом поясе запрещено такое использование территории или источников водоснабжения, которое может вызвать качественное или количественное ухудшение последних.

Третий пояс (зона наблюдения) охватывает смежную со вторым поясом территорию, неблагоприятное состояние которой может вызвать распространение инфекционных заболеваний через водопроводные сети.

Всем без исключения предприятиям и учреждениям запрещается спускать загрязненные сточные воды в границах зоны санитарной охраны, а также в пределах территории населенных пунктов.

Рассмотренная общая схема водоснабжения охватывает лишь наиболее распространенные варианты. На практике приходится встречаться с большим разнообразием схем, обусловленным местными условиями и различными требованиями потребителей. Особенно это относится к водопроводу промышленных предприятий.

Водоснабжение промышленных предприятий может быть прямоточным (рис. 4.2, а), последовательным (рис. 4.2, б) и оборотным (рис. 4.3, а, б, в).

При *прямоточном водоснабжении* забираемая из водоема вода после проведения технологического процесса возвращается в водоем, за исключением воды, безвозвратно теряемой в производстве.

Последовательное водообеспечение может быть двух-трехкратным, а количество сбрасываемых сточных вод уменьшается в соответствии с

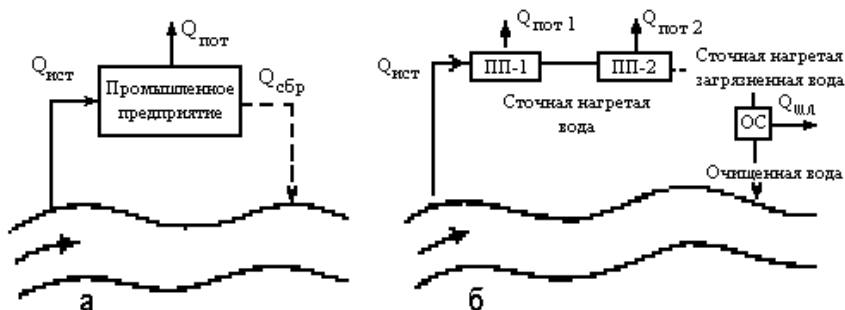


Рис. 4.2. Схема прямоточного (а) и последовательного (б) водоснабжения:

$Q_{сб}$ — сточная нагретая вода; $Q_{ист}$ — вода из водоема; $Q_{пот}$ — безвозвратно расходуемая вода; $Q_{шл}$ — вода, удаляемая со шламом; ПП-1, ПП-2 — промышленные предприятия; ОС — очистные сооружения

безвозвратными потерями на всех стадиях производства. При их прохождении дополнительно через очистные сооружения потери возрастают на количество вод, теряемых со шламами.

При *оборотном водоснабжении* промышленных предприятий возможны схемы с охлаждением (рис. 4.3, а), очисткой сточных вод (рис. 4.3, б) и комбинированные с одновременными очисткой и охлаждением (рис. 4.3, в).

В первом случае вода является только теплоносителем и в процессе использования лишь нагревается. Поэтому перед повторным применением ее предварительно охлаждают в пруду, брызгальном бассейне, градирне и т.д. (рис. 4.3,а). В случае непосредственного использования воды в технологическом процессе (реакционная среда, растворитель и др.) сточные воды перед повторным применением обрабатывают на очистных сооружениях (рис. 4.3,б). При комбинированном использовании их перед повторным употреблением очищают и охлаждают.

Для компенсации безвозвратных потерь воды при применении систем оборотного водоснабжения (на охладительных установках, в кана-

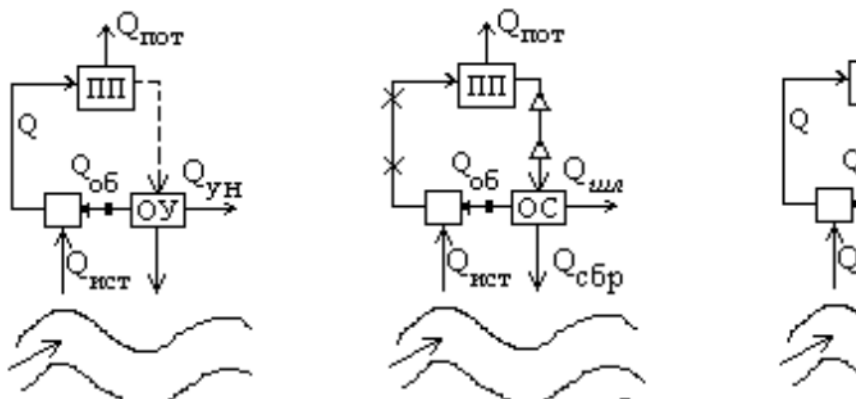


Рис. 4.3. Схема оборотного водоснабжения промышленных предприятий:

а — с охлаждением сточных вод; б — с очисткой сточных вод; в — с очисткой и охлаждением сточных вод; 1 — вода свежая чистая ненагретая; 2 — сточная вода нагретая; 3 — то же, ненагретая и загрязненная; 4 — то же, очищенная; 5 — сточная вода загрязненная; 6 — оборотная вода; ПП — промышленное предприятие; ОУ — охладительные установки; ОС — очистные сооружения; $Q_{\text{пот}}$ — вода, подаваемая на производственные нужды; $Q_{\text{об}}$ — оборотная вода; $Q_{\text{ун}}$ — вода, теряемая на испарение и унос из охладительных установок

лизацию, в процессе производства) осуществляют подпитку из открытых водоемов и других источников. Ее, в зависимости от условий, можно проводить постоянно или периодически. Количество добавленной воды составляет, как правило, 5-10% общего ее объема, циркулирующего в системе.

В зависимости от назначения объекта, требований потребителей к качеству воды и экономических условий, она может подаваться общим водопроводом или отдельным (для основных категорий водопотребителей). В городах обычно функционирует единый хозяйственно-противопожарный водопровод. Он же подает воду для хозяйственно-питьевых нужд промышленных объектов, расположенных в городе, и для технологических нужд тех из них, которым требуется вода такого же качества, как питьевая, например для пищевой промышленности.

Для промышленных предприятий в черте города, технологии которых не требуют воды питьевого качества, устраивают самостоятельные водопроводы. В отдельных случаях, особенно при небольших расходах, такие объекты, если для них невыгодно строительство специального водопровода, также могут получать воду из городской сети.

На самом предприятии прокладывают как общие, так и отдельные системы подачи воды для производственных и хозяйственно-питьевых нужд. Пожарный водопровод строят самостоятельным или совмещают с системой хозяйственно-питьевого или, значительно реже, производственного водоснабжения.

Для всех пользователей расход воды определяется по нормам водопотребления. Они регламентируют расход хозяйственно-питьевой воды в сутки на одного жителя или на одного работника предприятия, а расход воды для производственных целей — на единицу выпускаемой продукции или на один производственный агрегат в единицу времени.

За нормы водопотребления принимают оптимальное количество воды, необходимое для производственного процесса. Его устанавливают на основе передового опыта или научно обоснованного расчета.

Нормы водопотребления в различных отраслях производства изменяются в широких пределах и на единицу готовой продукции или исходного сырья составляют, м³/т: производство цемента — 0,1; добыча угля и нефти — 0,3 и 0,4; производство удобрений, бумаги, сульфитной целлюлозы — соответственно 3,9; 37 и 218; проката — 300; цветных металлов — 4000; продуктов растениеводства (с влагой почвы) — до 1 млн.

Водопотребление, не связанное с производственными нуждами, также весьма значительно. Так, суточный расход воды на одного жителя России составляет около 250 л, в Москве — до 450 л, в сельской местности — менее 100 л.

В настоящее время предприятия водоснабжения являются крупными хозяйственными объектами. В Российской Федерации практически полностью централизовано водоснабжение городов (98%), 81% поселков городского типа и 64 — сельского. Общая протяженность коммунальных водопроводных сетей составляет более 460 тыс. км, ее мощность около 90 млн м³/сут. Источники централизованного водоснабжения в 62-67% случаев подают поверхностные воды, а в остальных — подземные.

Качество воды во многих случаях неудовлетворительно. Из более чем 104 тыс. подземных и 2 тыс. поверхностных источников водоснабжения РФ соответственно около 17 и 41% из них в 2004 г. не отвечали санитарным правилам и нормам, в основном (до 90%) из-за отсутствия зон санитарной охраны. Свыше 35% водопроводов не снабжены комплексами необходимых очистных сооружений, 17% — обеззараживающими установками.

Положение усугубляется высоким износом оборудования и сетей водоснабжения (62% в 2001 г.). Это обуславливает утечки и неучтенные расходы воды в среднем по России более 15%. Они могут быть практически ликвидированы за счет совершенствования санитарно-технической аппаратуры, снижения избыточного давления в заводомерных и внутридомовых сетях, устранения утечек горячей и холодной воды, установки регуляторов ее расхода и квартирных водосчетчиков.

Внедрение подобных мероприятий позволяет снизить удельное водопотребление в новых микрорайонах с 395 до 216, а в микрорайонах старой застройки — с 628 до 392 л/(чел. · сут) против 100-200 л в западноевропейских странах. В частности, в ФРГ оно составляет около 130 л/(чел. · сут), и может быть снижено на 20% за счет повторного использования сточных вод, например после душа (ванны) — для смыва унитаза (Nolde).

В целом можно полагать, что в последние годы микробиологические и санитарно-химические показатели качества воды стабилизировались, но на недостаточно высоком уровне. В 2001-2004 гг. санитарно-химическим требованиям не соответствовало до 19,5% проб воды, микробиологическим — 7,3%.

Суммарное мировое водопотребление в 1995 г. достигло 3750 км³, в том числе безвозвратные потери — 2280 км³. В нашей стране забор воды из природных водных объектов в 2003 г. составил 82,4 км³. При этом свежей воды было использовано 64,1 км³, в том числе из поверхностных источников — 50,1; подземных — 8,5; морских — 5,5. Структура водопотребления, %: производство — 58,7; хозяйственно-питьевые нужды — 20,5; орошение — 13,1; сельское хозяйство — 1,4; другое — 6,3.

Потери воды во внешних сетях при транспортировке от водоисточников до водопотребителей достигали 8,4 км³. Значительны потери воды в промышленных отраслях народного хозяйства. В коммунальном секторе утечки и неучтенный расход воды составили 15,7%.

4.2. Водоотведение

4.2.1. Классификация сточных вод

Прямой сброс в водный бассейн использованной в быту и в сфере материального производства воды приводит к его загрязнению.

Источники загрязнения и загрязняющие агенты многочисленны и разнообразны, поэтому водный бассейн требует столь же существенных мер защиты от загрязнения, как и воздушный.

Под *загрязняющим агентом* водного бассейна понимают материальные субстанции (химические соединения, микроорганизмы, тепло), нарушающие нормы качества воды. Соответственно объекты, из которых они поступают, являются *источниками загрязнения*. Подавляющее большинство последних — техногенного происхождения. Среди них доминируют сбросы в водоемы сточных вод субъектами природопользования (предприятиями промышленности, коммунальными, сельскохозяйственными).

Физико-механические и биологические свойства сточных вод весьма различны. Основное влияние на них оказывают вид технологического процесса и перерабатываемого сырья, состав исходной воды, местные условия. Представление об уровне отдельных показателей, определяющих эти свойства, можно получить на примере стоков гидролизного завода, которые при рН 5,5 содержат, мг/л: плотный остаток — 8600; взвешенные вещества — 950; азот аммонийный — 150; фосфаты — 40; фурфурол — 50; БПК₅ — 2400; БПК_{полн} — 3300; ХПК — 4900.

Многообразие свойств, состава, источников сточных вод породило их классификацию по различным признакам.

Все *сточные воды* по источнику образования могут быть разделены на производственные, бытовые и атмосферные.

К *производственным* относят сточные воды технологических процессов (промышленных, сельскохозяйственных, транспортных и т.д.) изготовления и перемещения материальных благ.

В *бытовые* входят стоки от санитарных узлов, душевых и им подобных установок технологических производств, все стоки предприятий сферы услуг, коммунального хозяйства, жилищного фонда.

Атмосферные стоки представлены потоками дождя и тающего снега.

В зависимости от *степени загрязнения*, сточные воды, сбрасываемые в водоем, делят на незагрязненные (условно чистые), нормативно очищенные и без очистки (загрязненные).

К *условно чистым* относят такие стоки, которые не приводят к изменениям физико-химического состава водоема в месте сброса. Они не требуют предварительной очистки.

Нормативно очищенными называют прошедшие очистку стоки, сброс которых не приводит к изменению качества воды в водоеме. Содержание загрязняющих веществ в них соответствует предельно допустимым концентрациям.

К *загрязненным* относят стоки, сброшенные без очистки или недостаточно очищенные, содержащие загрязняющие вещества выше предельно допустимых норм.

По *генезису примесей* стоки классифицируют на загрязненные преимущественно неорганическими (металлургические и цементные заводы, предприятия основной химической промышленности и т.п.), органическими (нефтехимия, органический синтез), смешанными, т.е. органическими и неорганическими (нефте- и газодобыча), примесями, а также микроорганизмами (бактериями, вирусами), наиболее характерными для биохимических и биологических процессов.

По *концентрации загрязняющих веществ* производственные сточные воды подразделяют на четыре группы: I — 500, II — 501-5000, III — 5001-30000, IV — более 30 тыс. мг/л.

По *степени агрессивности* различают *неагрессивные* (рН 6,5-8,0), *слабоагрессивные* (рН 6,0-6,5 и 8-9) и *сильноагрессивные* (рН менее 6 и более 9) стоки. Это деление совпадает с представлениями соответственно о нейтральных, слабокислых и слабощелочных, сильнокислых и сильнощелочных средах.

Известна также классификация примесей воды, разработанная Л.Кульским. В ее основу положена *степень дисперсности* примесей и *однородности* стоков. Однако в ней допущены неточности в делении понятий. Например, в группу с размером частиц 10^{-3} - 10^{-4} см помещены грубодисперсные примеси и одновременно — суспензии (система Т-Ж) и эмульсии (система Ж-Ж), которые являются частными случаями более дисперсных коллоидных примесей. Нельзя также относить к молекулярно-дисперсным частицы с размером порядка 10^{-6} - 10^{-7} см, так как молекулярные размеры находятся в диапазоне 10^{-8} см. Таковы же и размеры ионов, но, по Л.Кульскому, они составляют 10^{-7} см. Эти и другие определения не соответствуют классификации систем по степени их дисперсности и фазовому составу, принятой в коллоидной химии. Однако система Л.Кульского содержит неоспоримую идею зависимости применяемых способов очистки сточ-

ных вод от дисперсности и состава содержащихся в них примесей. Используя эту ее сильную сторону, можно предложить следующую классификацию примесей по *степени дисперсности и методам удаления* из сточных вод:

1) *грубодисперсные и микрогетерогенные системы* с размером частиц примесей более 10^{-5} см. Последние представлены всеми видами веществ неживой природы, планктоном и бактериями. Методы очистки: механические безреагентные (седиментация, центрифугирование, фильтрация), сорбция, флокуляция, флотация, энергетическое воздействие (ультразвуковое, ультрафиолетовое излучение и др.);

2) *ультрамикрогетерогенные системы* (коллоидные растворы) с размером частиц 10^{-5} - 10^{-7} см. Эти системы также включают все виды веществ неживой природы и, дополнительно, вирусы. Методы очистки: сорбция, флокуляция, коагуляция для веществ неживой природы, ультразвуковая обработка, ультрафиолетовое облучение и другие методы при воздействии на вирусы;

3) *растворы* (размер примесей 10^{-8} см). Примеси в данном случае присутствуют в молекулярной, атомной (например, газы) и ионной формах. Методы очистки: сорбция, экстракция, окисление, электролиз, обратный осмос, нейтрализация с переводом примесей в осадок или малодиссоциированные соединения, биохимическая очистка.

4.2.2. Общая система канализации и количество сточных вод

Удаление сточных вод от объектов водопотребления осуществляется с помощью *систем канализации* — комплекса инженерных сооружений, предназначенных для приема, отведения, очистки и утилизации этих вод, сброса их в водоемы. Она включает следующие основные элементы: а) внутренние канализационные устройства; б) наружные канализационные сети; в) насосные станции и напорные водоводы; г) сооружения для очистки и утилизации сточных вод; д) выпуски в водоем.

Внутренняя канализационная сеть служит для приема сточных вод и отведения их за пределы здания.

В жилых и общественных зданиях внутренние домовые канализационные устройства состоят из приемников — санитарных приборов (унитазов, писсуаров, раковин, умывальников, моек, ванн и пр.), а также из сети отводных труб, стояков и выпусков. Приемники располагают в специальных помещениях (санитарных узлах), кухнях, прачечных и т.п.

В производственных помещениях внутренняя (цеховая) канализация устраивается или в виде сети труб, аналогичной внутренней домовой, или сделанных в полу и располагаемых у производственных аппаратов и машин открытыми или закрытыми сверху (бетонными плитами, рифленой листовой сталью) лотков, трапов и воронок.

Из внутренней канализации сточные воды поступают *в наружную канализационную сеть*. Она представляет собой разветвленные подземные коммуникации труб и каналов, самотеком отводящие стоки к насосной станции, очистным сооружениям или в водоем. В зависимости от назначения, места укладки и размеров, наружную канализацию называют *дворовой*, *внутриквартальной*, *заводской*, *уличной*, *коллекторами*, *каналами*. *Дворовая* объединяет выпуски из отдельных зданий. *Внутриквартальная* охватывает выпуски группы зданий или зданий квартала в целом. *Заводская* прокладывается по территории предприятий и принимает сточные воды от цехов и зданий. *Уличная* собирает сточные воды дворовых и внутриквартальных сетей.

Коллекторы представляют собой участок канализационной сети, принимающий сточные воды двух и более уличных линий или заводских сетей. Их подразделяют на несколько видов:

коллекторы бассейна канализования, объединяющие канализационную сеть всего бассейна, т.е. территории, ограниченной водоразделами;

главные коллекторы, объединяющие два или несколько коллекторов бассейнов канализования;

загородные, или *отводные коллекторы*, перемещающие сточные воды транзитом (без присоединения) за пределы объекта канализования к насосным станциям, очистным сооружениям или местам выпуска в водоем.

В крупных городах с сильно развитой городской сетью коллекторы больших размеров нередко называют *каналами*.

На очистные сооружения, если позволяет рельеф местности, сточные воды поступают самотеком. В противном случае в пониженных местах рельефа устраивают *насосные станции*, или *станции перекачки*, подающие стоки на очистные сооружения или на более высокую отметку, откуда они затем самотеком поступают к месту их очистки.

В зависимости от назначения, станции подразделяют на: *местные* для перекачки сточных вод одного или нескольких отдельных неблагоприятно расположенных объектов канализования; *районные*, передающие сточные воды отдельных районов или бассейнов канализования; *главные*, перекачивающие основную часть или все количество стоков канализуемого объекта. Участок канализационной сети, по которой сточные воды подаются от насосной станции до самотечного канала или очистных сооружений, называют *напорным водоводом*.

Очистные сооружения предназначены для удаления из стоков загрязнителей до уровня, при котором они не оказывают вредного влияния на принимающий водоем.

Выпуск представляет собой канал, отводящий сточные воды в водоем после очистных сооружений. Имеются также *аварийные выпуски*, устраиваемые на каналах или коллекторах перед насосной станцией для сброса стока в водоем без очистки при аварии на насосной станции.

Выпускные каналы крупных городов представляют собой внушительные инженерные сооружения, требующие больших капитальных затрат. Так, водоотводящая система Чикаго и его пригородов включает глубокие тоннели общей протяженностью 230 км и стоимостью около 3,5 млрд дол. На отдельных участках тоннели диаметром до 5 м проложены на глубине 50-100 м (Williams; Final...).

В зависимости от схемы поступления в канализационную сеть основных категорий сточных вод (бытовых, производственных и атмосферных), различают общесплавную, раздельную и полураздельную схемы канализации, а также комбинированную.

Общесплавная канализация принимает все три категории сточных вод. *Раздельная* система предусматривает независимое от бытовых и производственных удаление атмосферных вод (ливневую сеть, водосток). В свою очередь, раздельную схему подразделяют на полную раздельную и неполную раздельную.

При *полной раздельной* системе имеются две и более самостоятельные канализационные сети, по одной из которых отводят атмосферные, а по остальным — бытовые и загрязненные производственные воды.

При *неполной раздельной* системе канализацию строят только для бытовых и загрязненных производственных вод, а атмосферные воды поступают в водоем неорганизованно.

Полураздельная схема имеет две отводящие системы — производственно-бытовую и дождевую.

Схемы канализации зависят от множества факторов, например от рельефа местности, грунтовых условий, места расположения очистных сооружений, разновидности и степени загрязнения сточных вод.

На схему канализации промышленных предприятий влияют, кроме того, размещение цехов, внутризаводской транспорт и насыщенность заводской территории подземными сооружениями различного назначения, в частности производственными коммуникациями.

Масштабы сбросов в водный бассейн значительны. Общая масса жидких отходов в России и других странах СНГ оценивается в 160 млрд т, объем сточных вод РФ составляет 52,3 км³/г. Из них 40% приходится на воду, сбрасываемую без очистки. Объем норма-

тивно очищаемых стоков не превышает $2,3 \text{ км}^3$, или 11% от требующих очистки (2003 г.). Протяженность канализационных сетей составляет 120 тыс. км.

Загрязненные воды распределяются по территории страны неравномерно. Почти половина их попадает в Каспийское море, причем преимущественно из бассейна р. Волга. В последний сбрасывается $1/3$ стоков страны, на его долю приходится ~40% грязных и недостаточно очищенных вод. Около 20% стоков поступает в бассейн Карского моря — в основном в Енисей, Обь и их притоки.

По номенклатуре загрязняющих веществ основное количество в сбрасываемой воде составляют хлориды и сульфаты, а также нитраты, аммонийный азот, фенол, нефтепродукты, соединения меди, цинка и свинца.

Основной объем недоочищенных сточных вод приходится на жилищно-коммунальное хозяйство (почти 50%), далее следуют промышленность (32%) и сельское хозяйство (около 12%).

По составу наиболее разнообразны производственные сточные воды. Это требует большего, чем при бытовом водоотведении, спектра методов их очистки. В настоящее время система канализования крупных промышленных предприятий представляет собой сложный комплекс производственной, хозяйственно-фекальной и ливневой канализации. По этой причине представляется целесообразным наряду со сведениями по общей системе канализации дополнительно рассмотреть некоторые особенности организации водоотведения промышленных предприятий.

4.2.3. Организация водоотведения промышленных предприятий

Количество производственных сточных вод зависит от степени водопотребления и водоотведения, от соответствующих норм на них.

Нормой водоотведения является среднее количество сточных вод, удаляемых из производства в водоем при оптимальном водопотреблении. Норма водоотведения включает количества выпускаемых в открытые водоемы сточных вод (очищенных и неочищенных, производственных и бытовых), а также фильтрационных из прудов-осветлителей, хвостохранилищ, шламонакопителей.

Нормы водоотведения в случаях, когда вода не используется как сырьевой компонент, например в кондитерской промышленности, сопоставимы с нормами водопотребления (разд. 4.1).

Суточное количество $Q_{\text{сут}}$ производственных сточных вод рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{сут}} = NM, \quad (4.1)$$

где N — норма водоотведения на единицу продукции или перерабатываемого сырья с учетом водооборота, м^3 ; M — число единиц продукции или масса перерабатываемого сырья за сутки.

Объем бытовых сточных вод предприятия можно оценить по укрупненным нормам для каждой составляющей расхода отдельно (от душевых, столовых, прачечных и др.). Нормы зависят от характера производства и общего числа работающих и тем выше, чем тяжелее санитарно-гигиенические условия труда на данном предприятии. Последние ухудшаются в ряде: предприятия механосборочные, инструментальные, деревообрабатывающие — прядильные, текстильные — пищевые, фармацевтические, металлообрабатывающие, моечные — металлургия, подземная добыча полезных ископаемых, химическая промышленность. В последней на одного рабочего требуется ежедневно только для душевых примерно 200 л воды.

Расчетный сток дождевых (ливневых) вод определяется в зависимости от местных условий — района нахождения промышленного предприятия, рельефа, степени благоустроенности территории.

Все типы сточных вод промышленного предприятия поступают в его канализационную систему. При этом загрязненные воды должны отводиться несколькими самостоятельными потоками, на которые они делятся в зависимости от вида и концентрации примесей, количества и мест образования стоков. Потоки могут быть преимущественно слабозагрязненными, кислыми, щелочными, солевыми, содержащими масла и жиры, токсичные и ядовитые вещества. Незагрязненные сточные воды, как правило, объединяют в отдельный поток.

Бытовые сточные воды промышленных предприятий могут очищаться совместно или раздельно с производственными, в зависимости от состава и способа очистки последних. Данное обстоятельство определяется тем, что бытовые сточные воды должны подвергаться биохимической очистке во всех случаях. Если производственные стоки ее не требуют, то осуществляется отдельная обработка бытовых вод. Если же они загрязнены органическими веществами или биологическими примесями, то организуется совместное отведение бытовых и производственных сточных вод.

Дождевые воды отводятся самостоятельной сетью (ливневая канализация) или совместно с производственными сточными водами, иногда могут сбрасываться в водоем без очистки.

Из канализационных систем предприятий производственные сточные воды сбрасывают в городскую канализацию или в водоемы.

Сброс в городскую канализацию можно производить при расположении промышленного предприятия в городах или вблизи них. В этом случае осуществляется совместная очистка смеси бытовых и производственных сточных вод на единых очистных сооружениях. Часто системы очистки крупных промышленных предприятий используют и для обработки сточных вод близлежащих населенных пунктов.

К производственным сточным водам, сбрасываемым в городскую канализацию, предъявляют ряд требований. В частности, стоки не должны содержать: более 500 мг/л взвешенных и всплывающих веществ; горючих примесей, а также растворенных газообразных веществ, способных образовать взрывоопасные смеси в канализационных сетях и сооружениях; веществ, засоряющих трубы канализационных сетей или отлагающихся на их стенках; веществ в концентрациях, препятствующих биологической очистке сточных вод или сбросу их в водоем. Они также не должны корродировать материал труб и элементы сооружений канализации и иметь температуру не выше 40°C. Производственные сточные воды, не удовлетворяющие указанным требованиям, следует предварительно очищать, охлаждать или разбавлять до необходимых кондиций.

Условия выпуска производственных сточных вод в водоемы регламентируют «Санитарные правила и нормы охраны поверхностных вод», издаваемые Минздравом, в частности СанПиН 2.1.5-980-00. Выполнение условий контролируют санитарно-эпидемиологические станции. Правила и нормы предусматривают нормативы качества воды для водоемов двух категорий: 1) хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения; 2) рыбохозяйственного назначения. Отнесение их к тому или иному типу производят органы государственного санитарного надзора. Для водоемов в целом и для каждой категории в отдельности разработаны показатели, по которым лимитируется сброс производственных сточных вод, и установлены соответствующие нормативы.

4.2.4. Определение допустимого состава

и степени очистки сточных вод

Допустимый состав и необходимая степень очистки сточных вод устанавливаются по всем нормируемым показателям, в частности по количеству взвешенных веществ, величине БПК, растворенного кислорода, pH, температуре, окраске, запаху и солевому составу.

Различают условия выпуска сточных вод в проточные и непроточные водоемы, поскольку условия смешения в них существенно различ-

ны. В непроточных водоемах концентрация примесей хотя и значительно уменьшается уже в начальной зоне смешения, однако полностью оно происходит на значительно большем удалении от места выпуска, чем в проточных водоемах (реках).

Условия выпуска сточных вод в *непроточный водоем* определяют следующим образом.

При наличии только одного вида загрязнителя его допустимая концентрация $C_{\text{загр}}$ на сбросе в незагрязненный водоем, которая должна быть достигнута в результате очистки или другими способами, определяется по выражению:

$$C_{\text{загр}} \leq n \text{ПДК}_{\text{загр}} , \quad (4.2)$$

где n — кратность наименьшего разбавления сточных вод и соответствующего уменьшения концентрации загрязнителя при его перемешивании с водной средой, в которую он выпускается;

$\text{ПДК}_{\text{загр}}$ — предельно допустимая концентрация загрязнителя.

Если в водоеме имеется фоновая концентрация $C_{\text{ф}}$ единичного загрязнителя, то:

$$C_{\text{загр}} \leq n(\text{ПДК}_{\text{загр}} - C_{\text{ф}}) + C_{\text{ф}} . \quad (4.3)$$

При наличии в водоеме нескольких загрязнителей с фоновыми концентрациями:

$$C_{\text{загр}, i} \leq n(C_{\text{м}, i} - C_{\text{ф}, i}) + C_{\text{ф}, i} , \quad (4.4)$$

где $C_{\text{загр}, i}$ — концентрация i -го загрязнителя в сточных водах, которая должна быть достигнута в результате очистки;

$C_{\text{м}, i}$ — максимально допустимая концентрация i -го вещества с учетом концентраций и ПДК всех i -х веществ, относящихся к одной группе ЛПВ;

$C_{\text{ф}, i}$ — концентрация i -го вещества в воде водоема до сброса сточных вод.

В свою очередь:

$$C_{\text{м}, i} \leq \text{ПДК}_i \left(1 - \sum_{i=1}^{i-1} \frac{C_i}{\text{ПДК}_i} \right) . \quad (4.5)$$

Кратность n наименьшего разбавления равна:

$$n = \frac{C_{\text{загр}, i} - C_{\text{ф}, i}}{C_{\text{м}, i} - C_{\text{ф}, i}} . \quad (4.6)$$

При разбавлениях, больших наименьшего кратного, в формуле (4.6) взамен $C_{\text{м}, i}$ необходимо использовать C_i — концентрацию загрязняющих веществ в водоеме после сброса сточных вод, по физическому смыслу меньшую $C_{\text{м}, i}$.

Условия выпуска сточных вод в *проточный водоем* определяет неравенство:

$$C_{\text{загр},i} Q_{\text{загр}} + C_{\text{ф},i} m Q_{\text{вод}} \leq (m Q_{\text{вод}} + Q_{\text{загр}}) C_{\text{т},i}, \quad (4.7)$$

где m — коэффициент смешения, показывающий, какая часть воды в проточном водоеме смешивается со сточными водами в расчетном отводе;

$Q_{\text{вод}}$ — расход воды в водоеме в единицу времени;

$Q_{\text{загр}}$ — расход стоков вод, поступающих в водоем в единицу времени.

Значение $Q_{\text{вод}}$ определяется по данным гидрометеорологической службы, $Q_{\text{загр}}$ — по технологическим расчетам, $C_{\text{ф},i}$ — на основе натурных измерений или по справочным данным. Коэффициент смешения зависит от многих факторов: конструкции выпуска, расстояния до расчетного отвода, гидравлических характеристик потока, гидрогеологических параметров водоема и др. Он может быть рассчитан по известным формулам (*Яковлев...; Инженерная...*).

Кратность n наименьшего разбавления в проточном водоеме, помимо формулы (4.6), можно определять по выражению (4.8):

$$n = \frac{m Q_{\text{вод}} + Q_{\text{загр}}}{Q_{\text{загр}}}. \quad (4.8)$$

При условии полного смешения сточных вод, когда в нем участвует весь возможный для данного водоема объем V воды, концентрация C_i загрязняющего вещества в водоеме в произвольный момент времени равна:

$$C_i = \frac{t(C_{\text{загр},i} Q_{\text{загр}} + C_{\text{ф},i} \cdot Q_{\text{вод}})}{V}, \quad (4.9)$$

где t — период полного обмена воды в водоеме.

Степень очистки сточных вод по нормируемому показателю определяется концентрацией загрязнений в сточной воде до и после ее очистки и выражается в процентах. Так, степень α очистки от взвешенных веществ составляет:

$$\alpha = \frac{C_{\text{исх}} - C_{\text{загр},i}}{C_{\text{исх}}} \cdot 100 \%, \quad (4.10)$$

где $C_{\text{исх}}$ — концентрация загрязнителя до очистки сточных вод.

Аналогичны формулы для определения необходимой степени очистки по БПК_{полн}, ХПК, растворенным неорганическим веществам.

При выпуске кислых и щелочных стоков необходимо учитывать pH водоема, т.е. возможную его нейтрализующую способность. Это в ряде случаев позволяет обойтись без специальных сооружений или существенно сократить их мощности для нейтрализации сточных вод. Допус-

тимое содержание кислоты $C_{\text{загр, к}}$ или щелочи $C_{\text{загр, щ}}$ в сточных водах, спускаемых в водоем, определяется по уравнениям:

$$C_{\text{загр, к}} = (n-1)C_{\text{к}}, \quad (4.11)$$

$$C_{\text{загр, щ}} = (n-1)C_{\text{щ}}, \quad (4.12)$$

где $C_{\text{к}}$ и $C_{\text{щ}}$ — максимальная концентрация кислот или щелочей, которой можно нейтрализовать 1 единицу объема воды водоема (до рН 6,5-8,5).

Допустимые степень очистки по растворенному в воде водоема кислороду, температура, окраска и солевой состав сбрасываемых сточных вод устанавливаются опытным путем.

Во всех случаях, независимо от принятого способа очистки, повышению ее степени способствуют меры по стабилизации расхода и состава сточных вод. Изменчивость этих характеристик может существенно уменьшить эффективность работы очистных устройств или вывести их из строя. Так, залповые сбросы отработанных технологических растворов в термических, плавильных и гальванических цехах приводят к заметному увеличению концентрации тяжелых металлов в сточных водах на входе в очистные сооружения. Быстрое таяние снега, интенсивные дожди вызывают резкое повышение количества поверхностных сточных вод на входе в очистные сооружения, что также ухудшает условия их работы. Поэтому на входе в них для снижения колебаний концентрации примесей и/или расхода сточных вод устанавливают усреднители. Их объем зависит от значения коэффициента $K_{\text{п}}$ подавления:

$$K_{\text{п}} = \frac{C_{\text{max}} - C_{\text{ср}}}{C_{\text{д}} - C_{\text{ср}}}, \quad (4.13)$$

где C_{max} — максимальная концентрация примесей в залповых сбросах сточной воды;

$C_{\text{ср}}$ — средняя концентрация примесей в сточной воде на входе в очистные сооружения;

$C_{\text{д}}$ — допустимая концентрация примесей в сточной воде, при которой обеспечивается нормальная эксплуатация очистных сооружений.

При $K_{\text{п}} \geq 5$ объем V усреднителя определяется по формуле:

$$V = K_{\text{п}} \Delta Q \tau_3, \quad (4.14)$$

где ΔQ — превышение расхода сточных вод при залповом сбросе;

τ_3 — продолжительность залпового сброса.

При $K_{\text{п}} < 5$:

$$V = \frac{\Delta Q \tau_3}{\ln[K_{\text{п}} / (K_{\text{п}} - 1)]}. \quad (4.15)$$

4.3. Методы очистки сточных вод

4.3.1. Классификация

Выбор способа очистки зависит от ряда факторов и должен учитывать количество и степень загрязнения сточных вод, их физические, физико-химические, химические характеристики, возможность извлечения ценных и наиболее вредных продуктов, а также обеспечивать максимальное использование воды, до и после очистки, в технологическом процессе и системах водооборота.

Методы очистки сточных вод обычно классифицируют по характеру основных процессов, на которых они основаны. По этому признаку их подразделяют на механические, химические, физико-химические и биологические. Целесообразно, однако, уточнить данную классификацию, рассматривая те или иные процессы очистки сточных вод как некие технологии, приложенные к обработке жидких отходов. В таком случае эти методы, в соответствии с общей классификацией технологических процессов, следует разделить на физические, химические, физико-химические и биохимические.

Нелогично использование, как это делается в существующих классификациях, понятия «механические процессы», так как они только часть более общих физических методов. В свою очередь, лишь последние соразмерны с понятиями химических, физико-химических и биохимических процессов, являются видами равного с перечисленными понятиями уровня деления. Нельзя также не учитывать принципиальной разницы между биохимическими и биологическими процессами. При классификации технологических методов нами отмечалось, что в биопроцессах воспроизводятся сами субъекты живой природы, а биохимические технологии — это химические превращения, протекающие с участием субъектов живой природы, в которых конечным продуктом является неживая материя (кн. 1, разд. 1.2). Последнее и имеет место в технологиях очистки сточных вод, в которых не ставится, как самодостаточная, цель воспроизводства самого субъекта живой природы.

Из перечисленных выше факторов, влияющих на выбор способа очистки, решающими являются вид и концентрация преобладающих примесей стоков: взвешенные или растворенные, органические или неорганические и т.д. Именно они определяют основные характеристики сточных вод. Однако ни один из методов очистки самостоятельно не обеспечивает выполнения современных требований: очистка до ПДК (зачастую на уровне 0,1-0,01 мг/л и менее), возврат 90-95% воды в оборотный цикл, невысокая стоимость, малогабарит-

ность установки, утилизация ценных компонентов. Задача очистки стоков обычно решается совокупностью методов, дополняющих друг друга. При этом примеси выделяются в газообразную, твердую или жидкую фазу или разрушаются.

4.3.2. Физические

4.3.2.1. Общие сведения

Использование физических методов приводит лишь к изменению формы, размеров, агрегатного состояния, количественного соотношения и других физических свойств фаз, составляющих очищаемые системы. При этом в последних не исчезают прежние и не возникают какие-либо новые вещества.

В системах, подвергаемых физическим методам очистки, наиболее распространены загрязнители производственных и бытовых сточных вод в виде нерастворимых примесей (взвешенных веществ). Их концентрация изменяется в широких пределах — от 0,005 до 0,5%. Выделенные из воды в виде осадка, они представляют сильно обводненную массу с плотностью в десятки раз меньшей, чем первоначальная.

По степени дисперсности взвешенные вещества, как отмечалось (разд. 4.2.1), подразделяют на грубодисперсные (10^{-3} см и более), микрогетерогенные (10^{-3} - 10^{-4} см), коллоидные (10^{-5} - 10^{-7} см). Частицы коллоидных размеров могут находиться в состоянии кинетической устойчивости (во взвешенном состоянии) продолжительное время, а более крупные под действием гравитационных сил оседают или всплывают. Это их свойство лежит в основе многих методов физической очистки сточных вод.

Физические методы выделения из сточных вод взвешенных минеральных и органических примесей обычно применяют с целью их подготовки к более глубокой очистке другими способами. Гораздо реже они используются на окончательном этапе очистки. В совокупности физические методы обеспечивают выделение из сточных вод до 95-99% взвешенных веществ и снижают органические загрязнения (по БПК_{полн}) на 20-25%. Их разделяют на методы процеживания, отстаивания, центрифугирования, фильтрации, прилагая для улавливания частиц с различным диапазоном крупности. В качестве основного оборудования в них применяют различные модификации решеток, сит, отстойников, центрифуг, гидроциклонов и фильтров.

К группе физических следует отнести также и некоторые другие рассматриваемые ниже способы, применяемые для удаления растворимых примесей (разд. 4.3.2.6).

4.3.2.2. Процеживание

Процеживание — первичная стадия очистки сточных вод, предназначенная для выделения наиболее крупных (до 150 мм) нерастворимых примесей, а также более мелких волокнистых загрязнений, которые в процессе дальнейшей обработки стоков препятствуют нормальной работе очистного оборудования. Процеживание осуществляют, используя решетки и волокноуловители. Стоки подводят к механическим решеткам по прямоугольным каналам (коллекторам) с $B \times H$ до 2000×5000 мм.

Решетки изготовляют из металлических стержней с зазором между ними 5-25 мм, устанавливаемых в коллекторах вертикально или под углом $60-70^\circ$ к горизонту. Скорость стока даже при его максимальном расходе не должна превышать в зазоре 0,8-1,0 м/с, что обеспечивает минимальные потери напора на решетке.

При эксплуатации решетки должны непрерывно очищаться, что делают, как правило, с помощью механических, вертикальных или поворотных, грабель. При небольшом объеме отходов их собирают в контейнеры и удаляют, а при большом — дробят на отдельных дробилках и направляют в канал перед решетками или в переработку. Однако эта схема усложняет технологию очистки и ухудшает качество воздуха в помещениях очистных станций. Поэтому часто применяют решетки-дробилки, которые измельчают задерживаемые примеси, не извлекая их из воды. Ручная очистка решеток допускается при количестве загрязнений менее $0,1 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Наряду с грабельными получают распространение более эффективные ступенчатые, ленточные и роторные решетки кругового типа. Они позволяют увеличить массу задерживаемых частиц за счет уменьшения прозоров с 16 до 6 мм при равном гидравлическом сопротивлении, снизить трудоемкость ремонта и обслуживания, повысить плотность отбросов за счет их длительного пребывания над водой, например на ступеньках решетки (рис. 4.4).

Не задерживаемые решетками грубодисперсные загрязняющие вещества удаляют, процеживая сточные воды *через сетчатые барабанные фильтры*, которые условно подразделяют на *барабанные сетки и микрофильтры*.

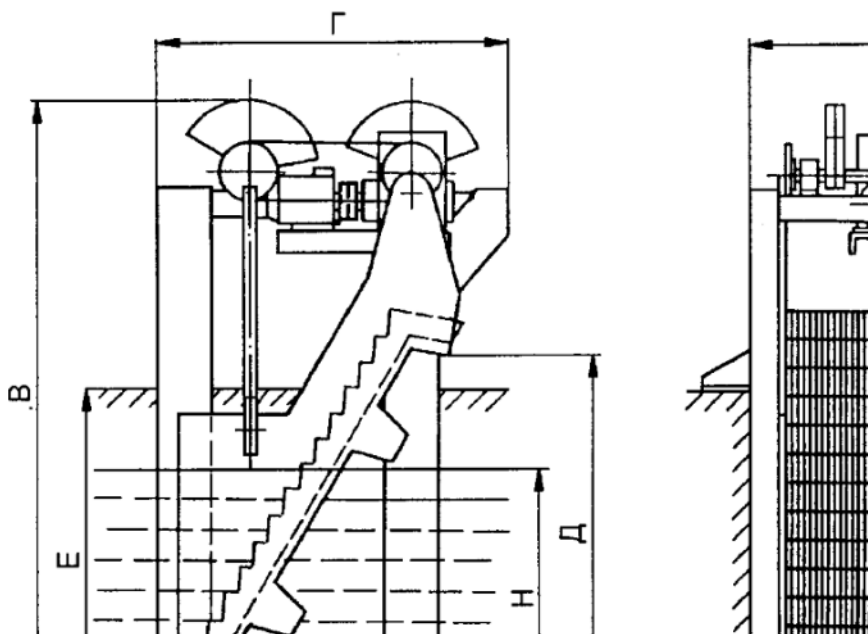


Рис. 4.4. Механическая ступенчатая решетка:

А — ширина решетки — ширина канала (бака); Б — ширина фильтрующей части; В — общая высота решетки; Г — длина решетки; Д — высота выгрузки осадка; Е — максимальная глубина канала (бака); Н — максимальный уровень жидкости перед решеткой

Барабанные сетки горизонтального и вертикального типов предназначены для задержания грубодисперсных примесей на металлических сетках с ячейками 0,5-0,8 мм, натянутых на вращающийся барабан. Окружная скорость его вращения составляет 0,1-0,5 м/с, скорость процеживания 40-50 м³/м²·ч. Стоки подают в барабан по пустотелому неподвижному валу, на котором барабан вращается на подшипниках. Задерживаемая сеткой масса смывается непрерывной струей воды под давлением 0,15-0,20 МПа, расход которой составляет обычно 1-2% от количества очищенной воды (Feldhusen...).

Барабанные сетки задерживают примеси в отсутствие в воде вязких веществ, снижают концентрацию взвесей на 25-40% при их исходном содержании не более 250 мг/л. Часто их устанавливают перед зернистыми фильтрами для глубокой очистки сточной воды. Производительность аппаратов составляет 10-100 тыс. м³/сут.

Микрофилтры по своей конструкции аналогичны барабанным сеткам и используются для удаления тонких взвесей растительного и животного происхождения и других примесей. Размер ячеек микрофилтров равен 20-40 мкм, их материал — металл или пластик. Содержание взвешенных веществ, поступающих на микрофилтры, не должно превышать 300 мг/л. При этих условиях эффект очистки от взвешенных веществ составляет 40-60%, что позволяет в отдельных случаях заменять ими первичные отстойники. БПК_{полн} при совместной очистке бытовых и сточных вод снижается на 25-30%.

4.3.2.3. Отстаивание

Методы отстаивания используют для осаждения взвешенных в воде или других жидких дисперсионных средах частиц дисперсной фазы, относящихся по размерам к грубодисперсным (крупнее 10^{-3} см). Отстаивание происходит под действием силы тяжести и, при соблюдении некоторых условий для сферических частиц диаметром d , подчиняется закону Стокса:

$$v_0 = \frac{(\rho - \rho_0)gd^2}{18\eta}, \quad (4.16)$$

где v_0 — скорость осаждения;

ρ — плотность осаждающихся частиц;

ρ_0 — плотность жидкости;

g — ускорение свободного падения;

η — коэффициент динамической вязкости.

При ρ больше, чем ρ_0 , примесная частица осядет, при ρ меньше ρ_0 она всплывет на поверхность жидкости.

Формула Стокса выведена в предположении свободного осаждения в ламинарном потоке жидкости частиц диаметром менее 1 мм, не взаимодействующих друг с другом. Условия свободного осаждения частиц практически сохраняются при их объемной концентрации до 1%, что соответствует массовой концентрации 12-26 г/л при плотности 1,2-2,6 г/см³, характерной для фракций земли, глины, песка. При этом отстаиваться могут как неслипающиеся частицы, сохранившие свои формы и размеры, так и частицы, склонные к флокуляции и коалесценции. Мешают отстаиванию факторы, нарушающие ламинарность движения жидкости и свободный характер отстаивания частиц. К ним относятся, например, перепад температур, неравномерность распределения воды в отстойнике, степень турбулизации потока.

Скорость осаждения частиц крупнее 1 мм определяется по формулам для промежуточного и турбулентного режимов. В последнем случае используют формулу Риттенгера:

$$v_0 = \kappa \sqrt{\frac{\rho - \rho_0}{\eta} g d} , \quad (4.17)$$

где κ — коэффициент, в зависимости от формы и плотности частиц принимающий значения 1,2-2,3.

Рассматриваемый метод очистки сточных вод реализуют в двух типах аппаратов: песколовках и отстойниках.

Основное назначение *песколовки* — задерживать минеральные взвеси крупностью более 0,2 мм. Их применяют для выделения из стоков частиц песка (литейные цехи), окалины (кузнечно-прессовое и прокатное производство), нефтесодержащих загрязнений, нерастворимых осадков (гипсовых и известняковых) станций нейтрализации сернокислотных вод и т.д. Обычно песколовки устанавливают на очистных сооружениях производительностью более 100 м³/сут.

Отечественная промышленность выпускает песколовки нескольких типов (горизонтальные с круговым и прямолинейным движением жидкости, вертикальные, аэрируемые).

Горизонтальные песколовки с круговым движением воды обеспечивают расчетную производительность по стокам 0,45-0,95 м³/с, количество снимаемых отходов 4,5 м³/сут, минимальный размер задерживаемых частиц 0,20-0,25 мм, степень осветления 92-98%. Они имеют более простую систему выгрузки осадка (Яковлев...).



Рис. 4.5. Схема горизонтальной песколовки

В горизонтальной песколовке с прямолинейным движением сточной воды (рис. 4.5) последняя поступает в песколовку 2 через входной патрубок 1. Оседающие твердые частицы скапливаются в шламосборнике 3 и на дне песколовки, а очищенная сточная вода через выходной патрубок 4 направляется для дальнейшей обработки.

Продолжительность продвижения воды от входного до выходного патрубка при ее скорости 0,15-0,30 м/с и толщине слоя около 2 м равна обычно 30-100 с. Пропускная способность этих песколовки 70-280 тыс. м³/сут. Они снабжены механизмами для перемещения осадка в бункер (цепными, тележеч-

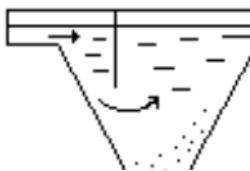


Рис. 4.6. Схема вертикальной песколовки

ными) или гидроэлеваторами и насосами для его транспорта к месту обезвоживания и другой обработки.

В *вертикальных песколовках* (рис. 4.6) вертикальная составляющая скорости движения воды невелика ($0,03-0,04$ м/с) при продолжительности пребывания стоков порядка 120 с и высоте слоя воды около 5 м.

Аэрируемые песколовки применяют для разделения твердых частиц по размерам и плотности. Они включают входную трубу 1, воздухопровод 2, воздухораспределитель 3, выходную трубу 4, шламосборник 5 с отверстием 6 для удаления шлама (рис. 4.7). Крупные фракции осаждаются так же, как в горизонтальных песколовках. Мелкие же частицы, обволакиваясь пузырьками воздуха, флотируются на поверхность и удаляются скребковыми механизмами. Продолжительность пребывания стоков при их входной скорости $0,1-0,2$ м/с составляет 30-90 с, расход воздуха равен $0,8-1,4$ л/м²·с.

Аэрируемые песколовки одновременно могут использоваться для улавливания всплывающих загрязнений (жиров, нефтепродуктов и др.), как преаэраторы.

Отстойники используют для выделения из сточных вод твердых частиц размером менее 0,25 мм. По конструкции резервуара различают *горизонтальные и вертикальные отстойники*. Для обработки сточных вод, имеющих специфические включения, например нефтяные, отстойники могут быть снабжены дополнительными устройствами для сбора всплывающих загрязнителей.

Горизонтальные отстойники применяют при количестве стоков свыше 15 тыс. м³/сут при горизонтальной скорости движения воды $0,01$ м/с, продолжительности и эффективности отстаивания 1-3 ч и 60%.

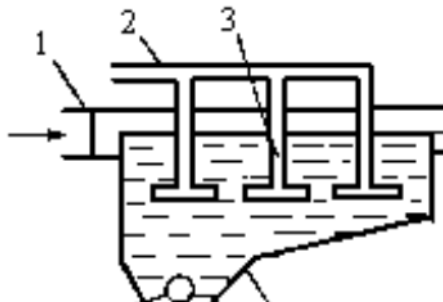


Рис. 4.7. Схема аэрируемой песколовки

По конструкции различают горизонтальные отстойники прямоугольные и круглые, близкие по устройству соответственно к горизонтальным песколовкам (рис. 4.5) и сгустителям, используемым в обогащении полезных ископаемых.

Прямоугольные отстойники имеют то преимущество перед

круглыми, что могут быть компактно совмещены с другими сооружениями, но обычно они стоят дороже. Длина их составляет несколько десятков метров при ее отношении к ширине, равном 3-6, и при глубине 2,5-4 м с уклоном днища 1° . Эти конструкции применяют только при небольшом количестве осадка. Удаление последнего производится скребковыми устройствами.

В последнее время получили распространение *тонкослойные отстойники*. В отличие от обычных прямоугольных они снабжены блоками с наклонными (под углом $30-85^\circ$ к горизонту) полками, что ускоряет процесс осаждения в 2-3 раза. Ил, попадая на нижнюю полку, сползает по ней в зону накопления осадка.

Круглые отстойники представлены радиальными и периферическими конструкциями.

Радиальные отстойники применяют для очистки больших объемов сточных вод, например на предприятиях черной и цветной металлургии, для бытовых сточных вод и т.д. Их используют для улавливания как относительно крупных (*первичные отстойники*), так и более мелких частиц (*вторичные отстойники*). Расчетное время отстаивания в них принимается равным 1,5 ч при скорости потока в первичном отстойнике не более 7 мм/с и во вторичных — не более 5 мм/с. В отечественной практике обычно применяют отстойники диаметром 16-50 м, иногда большего размера, с производительностью 0,20-0,36 м³/с.

В радиальной конструкции (рис. 4.8) очищаемая сточная вода по входному патрубку 1 с расширяющимся сечением на выходе поступает в отстойник снизу вверх. Расширение патрубка уменьшает скорость истечения стоков из трубопровода, повышая вероятность ламинарного осаждения твердых частиц. Очищенная сточная вода по отводящим трубопроводам 2 направляется для дальнейшей обработки, а шлам попадает в шламосборник 3 и вращающимся скребком 5 через канал 4 периодически удаляется из отстойника. Производительность таких отстойников более 20 тыс. м³/сут., эффективность отстаивания 60%.

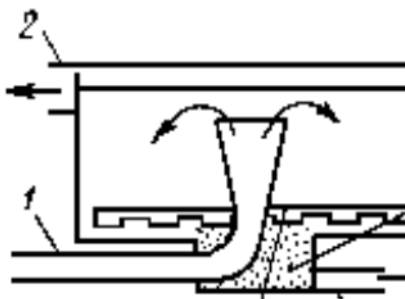


Рис. 4.8. Схема радиального отстойника

Несмотря на диффузорный характер подачи стоков, существенным недостатком радиальных отстойников является повышенная скорость их выпуска, поэтому

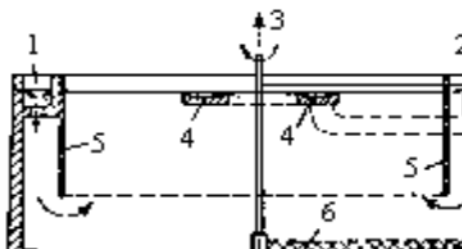


Рис. 4.9. Отстойник с периферийной подачей жидкости:
 1 — водоподводящий кольцевой лоток с дырчатым распределением;
 2 — то же, с водосливным распределением; 3 — привод скребковой фермы; 4 — водосборный кольцевой лоток; 5 — водонаправляющая кольцевая стенка; 6 — илоскреб;
 7 — водоотводящая труба; 8 — шламоотводящая труба

значительная часть объема сооружений используется неэффективно.

Этот недостаток в значительной степени устранен в отстойниках с периферической подачей сточной воды (рис. 4.9). Вода в них поступает из распределительных желобов через водосливы или через затопленные отверстия. Водонаправляющая кольцевая стенка не доходит до дна отстойника на 25-30% его расчетной глубины, и очищаемая вода поступает в сооружение на границе его иловой зоны, где условия для выделения взвешенных веществ наиболее благоприятны. Пропускная

способность отстойников с периферической подачей очищаемой воды почти в два раза превышает ее в радиальных отстойниках.

Вертикальные отстойники до недавнего времени относились к числу наиболее распространенных сооружений, однако в настоящее время применяются в основном при очистке бытовых стоков и значительно реже — производственных. Объясняется это тем, что гидродинамические условия осаждения в них взвесей менее благоприятны, чем в горизонтальных, а производственные сточные воды многих отраслей народного хозяйства содержат мелкие с небольшой плотностью механические примеси, выделение которых путем отстаивания малоэффективно. Кроме того, большая глубина отстойников затрудняет строительство в плотных грунтах и при высоком уровне стояния грунтовых вод. Их преимущество — простота конструкции, не содержащей движущихся частей. Удаление осадков реализуется за счет гидростатического давления столба стоков.

Вертикальные отстойники имеют в плане круглую ($d = 5-10$ м) или квадратную (до 14×14 м) формы с общей строительной высотой 5-9 м, разбиваемой на цилиндрическую и коническую части примерно в равном отношении. Угол наклона конических стенок составляет обычно $45-60^\circ$, что обеспечивает сползание по ним накапливаемого осадка. Скорость вертикального потока 0,5-0,6 мм/с, эффективность осаждения около 50%.

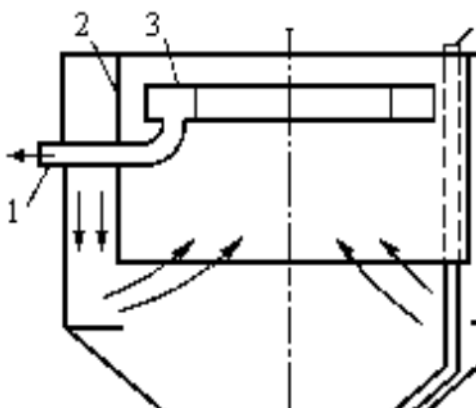


Рис. 4.10. Схема вертикального отстойника

Схема вертикального отстойника с периферийным выпуском воды представлена на рис. 4.10. Неочищенная сточная вода поступает по трубопроводу 5 в кольцевую зону, образованную цилиндрической перегородкой 2 и корпусом 6 отстойника. В процессе вертикального движения сточная вода встречает отражательное кольцо 7, направляющее поток во внутреннюю полость перегородки 2, а твердые частицы оседают в шламособорнике 8. Очищенная сточная вода попадает в кольцевой водосборник 3 и по трубопроводу 1 выводится из отстойника. Осадок из шламособорника периодически удаляется через трубопровод 4. Степень очистки в вертикальных отстойниках может достигать 40-45%. Их используют для выделения окалина из сточных вод кузнечно-прессовых и прокатных цехов.

Для всех методов отстаивания характерен ряд недостатков. Основные из них — низкая плотность осадка и существенная продолжительность процесса, что обуславливает невысокую производительность и большой объем отстойников. Эти недостатки в меньшей степени присущи методам разделения в поле центробежных сил и фильтрации.

4.3.2.4. Разделение в поле центробежных сил

Этот процесс осуществляют в открытых или напорных гидроциклонах и в центрифугах.

Открытые гидроциклоны (рис. 4.11) применяют для отделения из сточных вод крупных твердых частиц со скоростью осаждения более 20 мм/с. Преимущества их перед напорными — большая производительность и малые потери напора, не превышающие 0,5 кПа. Эффективность очистки зависит от характеристик примесей (вида материала, размера и формы частиц и т.п.), а также от конструктивных и геометрических характеристик самого гидроциклона. Обычно она равна 50-60%.

Открытый гидроциклон состоит из входного патрубка 1, кольцевого водослива 2, трубы для отвода очищенной воды 3 и шламоотводящей трубы 4. Диаметр d и высота цилиндрической части гидроциклона

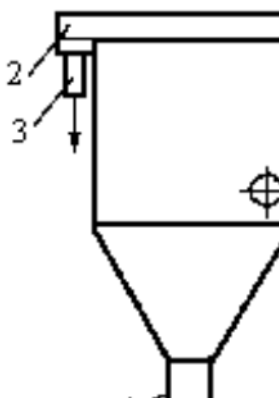


Рис. 4.11. Схема открытого гидроциклона

обычно равны 2-10 м, диаметр входного отверстия $0,1d$, угол конической части — около 60° .

Напорные гидроциклоны по конструкции аналогичны циклонам для очистки газов от твердых частиц (рис. 3.4). Диаметр их цилиндрической части составляет 50-500 мм, производительность до $85-90 \text{ м}^3/\text{ч}$, напор перед циклоном до 20-30 кПа. Аппараты диаметром более 100 мм служат для очистки от грубых примесей, а батарейные циклоны ($d=25-100$ мм, производительность $10-250 \text{ м}^3/\text{ч}$) — от более дисперсных при степени одностадийной очистки 80-85%.

Если в гидроциклонах центробежные силы, ускоряющие выделение частиц, создаются тангенциальным вводом жидкости и ее закручиванием вдоль стенок неподвижного аппарата, то в *центрифугах* центробежные силы создают вращением самого аппарата. Центрифуги для разделения эмульсий носят название *сепараторов*.

Мощность силового поля в центрифуге может превышать силу тяжести в сотни тысяч раз, что, в принципе, позволяет получить любую полноту разделения. Центробежное ускорение развиваемого силового поля (фактор разделения Φ_p) определяют по уравнению:

$$\Phi_p = 39,44 \cdot n^2, \quad (4.18)$$

где n — частота вращения, мин^{-1} ;

r — радиус вращения кольца жидкости, м.

Наиболее часто для обезвоживания осадков сточных вод используют центрифуги непрерывного действия. Поступление стока в них, выгрузка *фугата* (жидкой части) и кека осуществляются непрерывно. Основным элементом таких центрифуг — горизонтальный вращающийся цилиндр — конический блок и расположенный внутри него шнек, также вращающийся, но с несколько меньшей скоростью.

Непрерывно действующие центрифуги подразделяют на прямоточные и противоточные. Прямоточные конструкции пригодны для плотного осадка, противоточные лучше подходят для обезвоживания коллоидных гидрофильных осадков. Более распространены прямоточные центрифуги модификации НОГШ (рис. 4.12).

Они предназначены для разделения суспензий с концентрацией твердой фазы 1-40% (по объему), с крупностью частиц более 5 мкм и разностью плотностей твердой и жидкой фаз более $0,2 \text{ кг}/\text{дм}^3$. Ос-

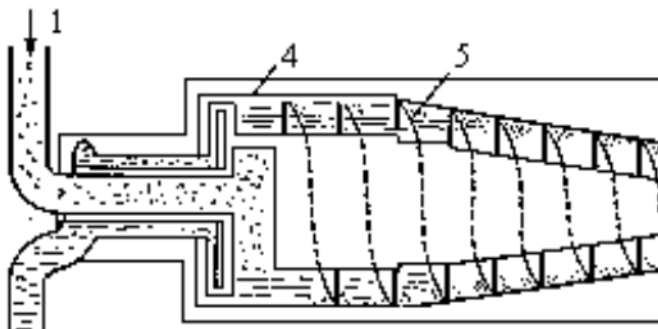


Рис. 4.12. Прямоточная непрерывнодействующая центрифуга с подачей осадка в центре:

1 — подача осадка; 2 — выгрузка кека; 3 — отвод фугата;
4 — ротор; 5 — винтовой скребок

новые технические параметры НОГШ: внутренний диаметр ротора 1100-1320 мм ($l/d = 2,5-3,5$; угол конусности $6-8^\circ$), наибольшая частота вращения $800-1000 \text{ мин}^{-1}$, фактор разделения 475-620, производительность $120-300 \text{ м}^3/\text{ч}$, доля извлечения примесей 70-90%, а при обработке сточных вод высокомолекулярными электролитами — до 85-99%, содержание сухого в кеке — 9-60%.

Имеются и более мощные центрифуги с частотой вращения 5000 мин^{-1} и производительностью по сухому веществу до 6000 кг/ч (Denkert).

4.3.2.5. Фильтрация

Фильтрация — наиболее эффективный метод очистки сточных вод от взвешенных частиц. Оно применяется как доочистная операция после химической, физико-химической и биохимической обработки стоков, так как использование некоторых из этих методов сопровождается выделением в очищаемой жидкости механических загрязнений.

Фильтрация реализуют либо на поверхности, либо в глубине фильтрующего материала.

Поверхностное фильтрование осуществляют через сетчатые перегородки (процеживание, микрофильтрование, фильтрование под давлением или под вакуумом и т.д.), через объемные элементы из пористых материалов значительной толщины (фильтры полимербетонные из пористой керамики, патронные фильтры), через жесткие каркасы из пористого материала с предварительно нанесенным фильтрующим слоем (намывные фильтры трубчатые, рамные, лотковые, барабанные и др.).

Глубинное фильтрование проводят, применяя однослойные или многослойные зернистые фильтрующие загрузки.

По характеру механизма задержания взвешенных частиц различают два основных вида глубинного фильтрования:

через сплошную «фильтрующую пленку» (осадок) загрязнений, образуемую в межзеренном пространстве загрузки (*медленные фильтры*). Скорость фильтрации на медленных фильтрах составляет 0,1-0,3 м/ч. В настоящее время новые медленные фильтры почти не строят;

без образования на поверхности загрузки фильтрующей пленки (*скорые фильтры*). В этом случае жидкость спокойно протекает в межзеренном пространстве, а частицы загрязнений высаживаются на зерна загрузки при ее высоте 1,5-2,0 м и скорости фильтрации 12-20 м/ч. Для очистки фильтра используют последовательно воздушную и водную продувки в направлении снизу вверх. Способ применяется для осветления мутных и цветных вод после коагулирования и отстаивания, при реагентном умягчении воды, при ее обезжелезивании и в других случаях.

В общем, методы фильтрования сточных вод, а также используемое оборудование аналогичны применяемым в других случаях, например в гидрометаллургии, обогащении, при очистке газов. Поэтому укажем лишь на некоторые особенности этого процесса.

При поверхностном фильтровании наряду с барабанными и дисковыми вакуумными широко применяют фильтры, работающие под внешним давлением на пульпу (фильтр-прессы). Их последние модификации весьма внушительны. Так, фильтр-прессы финской компании Larox имеют рабочую площадь единичного блока до 144 м². Новая модель Powerex RF обеспечивает производительность по сухому продукту до 60 т/ч. Она основывается на стандартных фильтровальных плитах площадью 6 м² с их набором до 10 штук при максимальной производительности. Рабочее давление фильтр-пресса достигает 16 бар (New...).

В последнее время большое внимание уделяется разработке и применению ленточных фильтр-прессов (ЛФП). В сравнении с центрифугами они имеют в несколько раз меньший расход электроэнергии, просты в ремонте и обслуживании. Производительность отечественных ЛФП фирмы «БИФАР» составляет 1-15 м³/ч, в зависимости от ширины ленты (500-1500 мм). Установка перед ними ленточного сгустителя позволяет повышать концентрацию твердой фазы в обезвоженном осадке до 15-40%. При этом производительность ЛФП-1500 увеличивается с 10-13 до 22-27 м³/ч. При использовании флокулянтов их расход не превышает 1,75-2,0 кг/т осадка (Гюнтер).

При использовании зернистых фильтров для глубинного фильтрования направление движения потоков воды может быть *нисходящим* (сверху вниз) или *восходящим* (снизу вверх) при однослойной или многослойной загрузках фильтрующего материала. Скорость потоков составляет 10-15 м/ч.

Главный недостаток фильтра с восходящим потоком заключается в возможной взвешенности верхнего слоя загрузки, ограничивающей дальнейшее увеличение скорости фильтрования.

Наиболее распространены и просты по конструкции *однослойные фильтры* с нисходящим потоком. В качестве фильтрующего материала

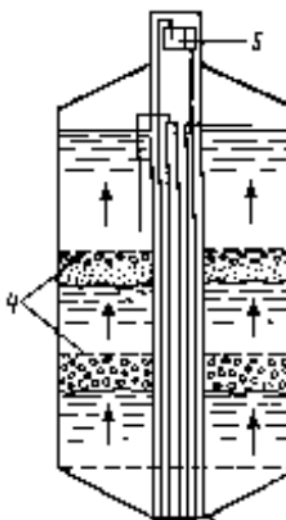


Рис. 4.13. Фильтр с плавающей загрузкой:

- 1 — отвод промывной воды; 2 — сифон;
- 3 — подача воды на очистку; 4 — дренажные решетки;
- 5 — бак-регулятор;
- 6 — плавающая загрузка; 7 — отвод фильтрата;
- 8 — зарядное устройство сифона

в них могут быть использованы гравий, щебень, мраморная крошка, антрацит, вулканические туфы, керамзит, доменный шлак, горелая порода, шунгизит. Наиболее эффективно применение песка с размером зерен 1-2 мм, однако он сравнительно дорог и дефицитен. Промывка фильтра ведется обратным потоком воды с подачей воздуха. Фильтрация сточных вод в слое загрузки высотой 1-2 м (после химической или физико-химической очистки) снижает содержание взвешенных веществ на 70%, а БПК₅ — приблизительно на 40%, доводя их концентрации до 20 мг/л и менее. Фильтрация после биохимической обработки обеспечивает 80%-ю эффективность очистки по взвешенным веществам и 60%-ю — по БПК₅.

Для многослойных фильтров в качестве загрузки используют антрацит, песок, гранит и ильменит с плотностью соответственно 1,5; 2,6; 4,2; 4,8. Грязеемкость многослойных фильтров, состоящих из слоев крупной, а затем мелкой засыпки, при примерно одинаковой высоте загрузки в 2-3 раза больше, чем однослойных.

В последние десятилетия получают распространение водоочистные технологии и сооружения с плавающим фильтрующим слоем, имеющим меньшую, чем у воды, плотность. Идея этого способа принадлежит В.Г.Ильину, первые исследования в

1963-1966 гг. провели С.И.Мороз и М.Г.Журба, используя гранулированную пенополистирольную загрузку. В настоящее время внедряют фильтры с волокнисто-пенополистирольной и волокнисто-пенопластовой загрузкой (с нисходящим и восходящим потоками, напорные и безнапорные, многоярусные и многослойные). Конструкция двухъярусного фильтра с плавающей загрузкой из пенополистирола представлена на рис. 4.13.

К преимуществам ФПЗ относится простота их конструкции, так как отпадает необходимость в применении материалоемких дренажных систем, поддерживающих слоев, промывных насосов. Упрощается регенерация загрузки, которая сводится к отжиманию из нее жидкости с поглощенными загрязнениями. Как следствие, капитальные затраты на стадии фильтрации снижаются на 15-20, а эксплуатационные — на 25-35%, транспортные расходы на доставку загрузки сокращаются в 10-15 раз.

Параметры ФПЗ: толщина рабочего слоя до 1,5 м, диаметр гранул 0,5-0,6 мм, скорость фильтрации 0,6-20 м/ч, исходная концентрация взвеси до 1000 мг/л, ее извлечение при продолжительности цикла фильтрования 1-20 сут составляет 50-85%. Метод особенно эффективен при доочистке биохимически очищенных бытовых сточных вод из вторичных отстойников. Так, при входной концентрации взвеси 20-150 мг/л и БПК₅ 4-27 мг/л выходная их концентрация при продолжительности цикла фильтрования 3 сут составляет 3-6 мг/л, содержание аммонийного азота снижается до 1-5 мг/л. Перспективно также комбинирование ФПЗ с блоками центрифугирования, озонирования и электрокоагуляции, контактного смешения и хлопьеобразования.

В настоящее время ФПЗ используют в черной металлургии, коммунальном хозяйстве, водозаборных скважинах, при микроорошении, в гальваническом производстве и при очистке нефтесодержащих сточных вод, на предприятиях кожевенной, винодельческой, легкой, химической, строительной промышленности и т.д. Уже внедрено более 200 фильтров с производительностью 10-25000 м³/сут. Общая площадь некоторых из них достигает 420 м². Фильтры с плавающей загрузкой начинают применять и за рубежом (Журба).

Заканчивая в целом рассмотрение методов фильтрации, отметим их высокую эффективность прежде всего при очистке питьевых вод от вирусов и бактерий. Так, по данным двухлетних исследований на водопроводных станциях Франции, песчаные фильтры с размером зерен 0,5-0,6 мм, высотой фильтрующего слоя 50-70 см и скоростью фильтрации 5 м/ч обеспечивают удаление вирусов на 77-99, бактерий — на 99%. Скорая фильтрация менее эффективна, но и она позволяет задерживать 90-99% бактерий (Гончарук...).

4.3.2.6. Другие методы

Эвапорация (отгонка с водяным паром) основана на том, что при нагревании растворов, содержащих летучие вещества, последние вместе с паром переходят в газовую фазу. Среди эвапорационных методов наибольшее распространение получили пароциркуляционный способ и азеотропная ректификация.

Пароциркуляционный способ применяют для удаления из сточных вод фенолов, крезолов, нафтолов и других веществ, осуществляя его в аппаратах периодического или непрерывного (дистилляционные колонны) действия. При движении навстречу перегретому пару через колонну с насадкой сточная жидкость нагревается до 100°C , присутствующие в ней летучие примеси переходят в паровую фазу, распределяясь между ней и стоками в соответствии с величиной коэффициента их распределения. Последний при концентрациях примесей порядка 0,01-0,1 н (близких к бесконечно разбавленным растворам) для фенолов и других перечисленных выше веществ равен 3,5 и более в пользу парообразной фазы.

Основные параметры эвапорационных колонн: диаметр 0,8-3,0 м, высота насадки 6-12 м, ее материал — фарфоровые кольца, кокс, дробленый кварц (все с удельной поверхностью 40-110 $\text{м}^2/\text{м}^3$), плотность орошения 1-2 $\text{м}^3/\text{м}^2\cdot\text{ч}$, расход пара 0,5-1,5 кг/кг примесей, производительность 20-200 $\text{м}^3/\text{сут}$.

Выходящий из колонны пар промывается раствором щелочи, в который переходят загрязнения. При нейтрализации щелочного раствора загрязнения выделяются из него и могут быть удалены отстаиванием.

Азеотропная ректификация основана на свойстве некоторых двухкомпонентных растворов разделяться при нагревании на чистый компонент и азеотропный (нераздельнокипящий) раствор постоянного состава, содержащий повышенную долю второго компонента. В этом способе сточная вода проходит через колонну, обогреваемую паром, разделяясь на испаряемую азеотропную смесь воды с повышенным содержанием загрязнителя и очищенную воду. Азеотропная паровая смесь поступает в конденсатор. Конденсат после дополнительного охлаждения разделяют в сепараторе на воду, сбрасываемую в исходные стоки, и органическую фазу, поступающую на дальнейшую переработку или на повторное применение.

К азеотропным системам относятся некоторые водные растворы спиртов, азотной и соляной кислот, смеси спиртов с бензолом и хлороформом и др.

Выпаривание применяют для увеличения концентрации солей, содержащихся в сточных водах, и ускорения их последующей кристалли-

зации. К нему прибегают и для обезвреживания небольших количеств высококонцентрированных сточных вод, если другие способы оказываются экономически нецелесообразными. В последнее время метод нашел широкое применение при обезвреживании концентрированных радиоактивных и других жидких отходов (разд. 8.3.2). Различают выпаривание простое и под вакуумом (одно- или многоступенчатое).

Простое выпаривание производят в открытых емкостях, нагревая стоки с помощью пара низкого давления до температур кипения. Такой вариант обуславливает большой расход тепла. При выпаривании под вакуумом можно значительно снизить температуру кипения и расход тепла, однако вакуумные установки более сложны и дороги.

В последние годы разработаны выпарные установки производительностью 6-120 л/ч по сточным водам, использующие инфракрасные излучатели. Испарение воды в них происходит только в облучаемой зоне в слое 0,05-0,1 мм, что исключает проблемы накипеобразования и вспенивания. Простота регулирования мощности излучения и возможность использования природного газа или биогаза как источников энергии для инфракрасных излучателей существенно расширяют область использования нового выпарного оборудования (Nit...).

Испарение, в отличие от выпаривания, реализуемого при температуре кипения, осуществляется только с поверхности жидкости, организуется обычно в естественных условиях и протекает практически при любой температуре. Площадь испарителей рассчитывается в зависимости от климатических и грунтовых условий.

Процесс испарения положен в основу новой технологии термической сушки осадков сточных вод. Она реализуется в печи с одной или несколькими расположенными друг над другом лентами из искусственного волокна или металлическими с отверстиями. Лента с осадком СВ движется в непрерывном режиме, перпендикулярно ее плоскости через нее и осадок поступает теплый воздух. Время сушки составляет 1 ч, расход электроэнергии равен 830-950 кВт · ч/кг осадка (Гюнтер).

Кристаллизация основана на изменении растворимости веществ при различных температурах. При снижении последней обычно уменьшается их растворимость, в том числе примесей сточных вод. При достижении ими степени пересыщения в растворе они из него выкристаллизовываются, жидкая фаза становится чище. Процесс кристаллизации можно интенсифицировать, ускоряя испарение жидкости.

Применение этого метода целесообразно при обработке небольших количеств концентрированных сточных вод. При необходимости обработки методом кристаллизации недостаточно концентрированных стоков их предварительно выпаривают.

Кристаллизацию осуществляют в аппаратах непрерывного и периодического действия, в последнем случае — при естественном, за счет испарения воды с перемешиванием, и искусственном охлаждении.

Первопарация является разновидностью испарения, которое в данном случае реализуется через мембрану. Процесс заключается в том, что нагретая жидкость достигает внутренней поверхности мембраны, частично проникает через нее и испаряется с ее внешней стороны. Образующийся при этом парообразный пермеат удаляют вакуумированием или в потоке газа-носителя, например воздуха.

С начала 70-х годов первопарация используется для обезвоживания органических растворителей и спиртов, опреснения воды, очистки веществ в пищевой промышленности и других отраслях (Применение...).

Вымораживание проводится при температурах заморозания воды или сточных жидкостей и осуществляется в случаях, когда концентрации примесей не достигают насыщения, и загрязнители не переходят в лед, а, в отличие от кристаллизации, остаются в жидкой части. При повышении концентрации примесей до близкой к насыщению раствор направляют на переработку или обезвреживание, а лед после таяния можно использовать для различных бытовых и технологических нужд.

В домашних условиях вымораживание применяют, в частности, для очистки водопроводной питьевой воды. Воду вымораживают не полностью, жидкую часть, содержащую сконцентрированные в ней примеси, сливают. Лед растапливают, полученную воду нагревают до кипения, при этом из нее выпадает (коагулирует) дополнительное количество примесей, преимущественно гидроксидов железа, которые легко отделяются при фильтровании через марлю. Отфильтрованная вода по вкусу, чистоте и прозрачности соответствует родниковой.

Замораживание сточных вод используют как способ их очистки и обеззараживания. Его осуществляют дождеванием сточных вод или их распылением на мельчайшие капельки сжатым воздухом на установках искусственного снега при отрицательных температурах атмосферы. В последнюю при замораживании выделяется углекислый газ, увеличивается рН стоков, от воды отделяются загрязнения. Эффект обеззараживания усиливается воздействием солнечной радиации как при складировании льда, так и при его таянии в теплый период года. По данным S.Kneisel, применение замораживания снижает расходы на очистку стоков вдвое по сравнению со стабилизацией в аэрируемых прудах.

Магнитная обработка внедрена при очистке сточных вод металлургических предприятий от ферромагнитных механических примесей, а также в системах оборотного водоснабжения для предупреждения накипеобразования в теплообменных аппаратах.

Следует иметь в виду, что эффект магнитной обработки в водных растворах и взвесьях весьма неустойчив, всецело определяется составом примесей, внешними условиями и наиболее выражен при наличии ферромагнитных частиц. Однако в дистиллированной воде, как показывают теоретические расчеты и эксперименты, эффекты магнитной обработки в принципе отсутствуют.

4.3.3. Химические

Химические методы применяют для удаления из сточных вод *растворимых* загрязнителей, используя различные реагенты. При взаимодействии с примесями последние образуют безвредные соединения или малорастворимые осадки, в состав которых переходят элементы вредных веществ. Таким образом, изменяются не только физические, но и химические свойства подвергаемых очистке систем, в строго эквивалентных количествах реагируют, исчезают и возникают различные вещества.

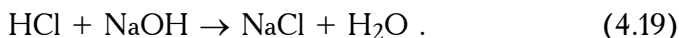
Химические методы очистки можно применять самостоятельно перед спуском стоков в водоем или в канализацию. В ряде случаев химическую очистку целесообразно осуществлять перед биохимической обработкой сточных вод. Используют ее и как метод глубокой очистки производственных стоков с целью их дезинфекции, обесцвечивания или извлечения различных компонентов.

Основными методами химической очистки являются нейтрализация и окисление.

4.3.3.1. Нейтрализация

Нейтрализацию осуществляют для приведения рН сточных вод к 6,5-8, т.е. к среде, близкой к нейтральной. Более опасны (химически активнее) и чаще, в сравнении с щелочными, встречаются кислые стоки. Последние обычно загрязнены минеральными кислотами (серной, азотной, соляной, фосфорной, сероводородной, плавиковой, хромовой и др.), их смесями, а также органическими кислотами (уксусной, салициловой и пр.).

Все методы нейтрализации основаны на взаимодействии кислоты с основаниями или основными окислами с образованием соли и воды, например:



Соль, в зависимости от величины ее растворимости, остается в растворе или выпадает в осадок.

Применяют следующие способы нейтрализации:

взаимную кислотных и щелочных сточных вод их смешением;
реагентную (растворами кислот, негашеной и гашеной известью, кальцинированной Na_2CO_3 и каустической NaOH содой, раствором аммиака);

на специальных фильтрах, пропуская сточные воды через нейтрализующие материалы (известь, известняк, доломит, магнезит, обожженный магнезит, мел и т.д.).

Из отмеченных способов взаимная нейтрализация, при реальной возможности получить необходимую pH , всегда предпочтительнее, так как не требует затрат реагентов и практически не ограничена во времени.

Нейтрализацию реагентами и на фильтрах реализуют при равномерной подаче сточных вод, содержащих сильные кислоты или щелочи, когда невозможно осуществить взаимную нейтрализацию. Распространенным реагентом для нейтрализации кислотных стоков в настоящее время является гашеная известь, а для щелочных — техническая серная кислота.

В последнее время предложены способы нейтрализации щелочных сточных вод дымовыми газами, содержащими кислотные оксиды CO_2 , SO_2 , NO_x и др. Это позволяет одновременно очищать газы от данных компонентов.

Нейтрализация сточных вод осуществляется на станциях реагентной нейтрализации (принципиальная схема представлена на рис. 4.14). Аппаратура станций (резервуары-усреднители стоков, емкости для приго-

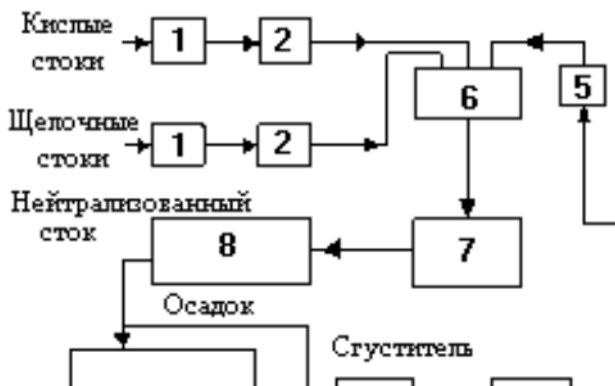


Рис. 4.14. Принципиальная схема станции нейтрализации:

- 1 — песколовки; 2 — усреднители; 3 — склад реагентов; 4 — рас-
творные баки; 5 — дозатор; 6 — смеситель; 7 — нейтрализатор;
8 — отстойник; 9 — осадкоуплотнитель; 10 — вакуум-фильтр;
11 — накопитель обезвоженных осадков; 12 — шламовые площадки

товления рабочих растворов реагентов, трубопроводы, насосы и т.п.) выполняют в антикоррозионном варианте.

Перемешивание стоков с реагентами производится лопастными или пропеллерными мешалками с вертикальной осью вращения. Продолжительность контакта сточных вод и реагентов в зависимости от их состава равна 5-30 мин, и она увеличивается, если в стоках есть ионы цветных металлов.

Для отстаивания осадков нейтрализации применяют горизонтальные радиальные или вертикальные аппараты со временем пребывания в них сточных вод не менее 2 ч. Продолжительность процесса уменьшается при использовании флокулянтов, например 1%-го раствора полиакриламида.

После отстаивания осадок обезвоживается на шламовых площадках с дренажем. Их устраивают на открытом воздухе или в закрытых утепленных помещениях, оборудованных механизмами для удаления осадков. Пропускная способность площадок в закрытых помещениях составляет $10-15 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{год})$.

Если станция нейтрализации не имеет шламовых площадок, то нейтрализованные стоки перекачивают в осадкоуплотнители (сгустители) со временем пребывания в них не менее 6 ч. Затем сгущенный осадок обезвоживают на вакуум-фильтрах, фильтр-прессах или в центрифугах.

Место складирования обезвоженных осадков выбирают по согласованию с местными органами санитарной инспекции.

Известны также передвижные установки производительностью до $1,5 \text{ м}^3/\text{ч}$ по стокам, размещенные на автомобильной платформе с прицепом (Mobile...).

4.3.3.2. Окисление

Окисление проводят с целью обезвреживания производственных сточных вод, содержащих токсичные примеси или соединения, извлечение которых нецелесообразно. В качестве окислителя используют хлор, гипохлориты натрия и калия (NaClO и KClO), диоксид хлора ClO_2 , озон, технический кислород и кислород воздуха, пероксид водорода H_2O_2 , перманганат калия KMnO_4 , бихромат калия $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ и другие неустойчивые вещества, выделяющие при разложении химически активный атомарный кислород, служащий энергичным окислителем. При окислении растворенные ядовитые вещества переходят в нетоксичные соединения, в том числе выпадающие в осадок и удаляемые последующими отстаиванием или фильтрацией. Наиболее часто используют хлорирование и озонирование сточных вод, являющиеся одними из самых распространенных способов их очистки от ядовитых цианидов и ряда других органических и неорганических со-

единений. Цианиды в сточных водах образуются на машиностроительных и металлообрабатывающих заводах в гальванических цехах, а также при промывке изделий после закалки их в расплаве цианидов. Обычное содержание цианидов в таких сточных водах составляет 20-100 мг/л и более.

При хлорировании вводимый в воду хлор через ряд элементарных стадий реакции превращает цианиды в безвредные диоксид углерода и азот. Суммарная реакция окисления хлором цианистой кислоты выглядит следующим образом:



Хлорирование в настоящее время является самым распространенным среди химических методом обеззараживания воды. Реагент сравнительно недорог, активен, обладает широким спектром антимикробного действия, легко дозируется и контролируется. В основном используется сжиженный хлор, сохраняемый под давлением в баллонах.

Последнее обуславливает один из серьезных недостатков обработки воды хлором, так как создается потенциальная опасность возникновения чрезвычайных аварийных ситуаций.

Кроме того, многочисленные данные свидетельствуют, что хлорирование питьевой воды и сточных вод приводит к образованию хлорорганических соединений, в том числе хлораминов и хлороформа. Содержание последнего, как правило, на 1-3 порядка больше, чем других летучих галогенорганических соединений. Хлорорганика вызывает высокие уровни мутагенной активности и токсичности, канцерогенные эффекты. Это усугубляется тем, что образующиеся хлорорганические соединения обладают высокой стойкостью, вызывая загрязнение водоемов на значительной площади и практически не извлекаясь в процессе водоподготовки.

В связи с изложенным потребление хлора в Европе, США, Японии сокращается. Однако, несмотря на многочисленные недостатки хлора и его соединений, отказ от них полностью в водоподготовке в ближайшее время невозможен, поскольку ни один метод (кроме серебрения воды) не обладает необходимым последствием, что весьма важно для сохранения качества воды в распределительных сетях. Поэтому какими бы другими методами ни обрабатывали воду (озонирование, ультрафиолетовое облучение и т.п.), ее необходимо хлорировать перед подачей в сеть (Гончарук...).

Метод озонирования, впервые использованный во Франции для обработки питьевых вод (1897 г.), в настоящее время зачастую рассматривается как альтернатива хлорированию. В качестве составляющей общего технологического процесса он применяется на тысячах водопроводных станций Европы, в основном во Франции, Германии и

Швейцарии. Только в Германии в 1997 г. насчитывалось около 3 тыс. станций озонирования, в том числе для подготовки питьевой воды — 388, в оборотном водоснабжении — 239, на канализационных очистных сооружениях — 134, в плавательных бассейнах — 1908, в производстве прохладительных напитков — 404 (Жуков...). Озонирование используют также в Японии и США. В России начиная с 1976 г. озонирование внедрено или готовилось к внедрению на водопроводных станциях Москвы, Н.Новгорода, Кургана, Тюмени, Ярославля, Самары, Перми и других городов.

Основные преимущества озона в сравнении с иными реагентами:

большая, чем у хлора, активность, одновременно с обеззараживанием удаляются другие загрязнения воды (цветность, запах, привкус, железо, марганец и т.д.);

высокая биоцидная активность, в том числе в отношении вирусов и цист простейших;

увеличение эффективности последующих стадий водообработки — коагуляции и флокуляции;

компактность установок, удобство их эксплуатации, меньшая громоздкость реагентного хозяйства;

отсутствие побочных токсичных хлорорганических продуктов реакции, улучшение экологического состояния водоемов вследствие исключения последствия очищенных и обеззараженных сточных вод на жизнедеятельность водоемов;

получение непосредственно на очистных сооружениях в озонаторах; постоянство рН или солевого состава очищаемых сточных вод.

Обычная концентрация озона в озоновоздушной смеси составляет 10-20 г/м³.

Ограничения по применению озона:

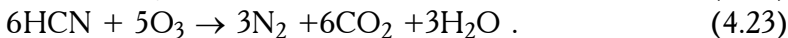
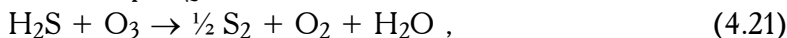
неустойчивость в воде. Полагают, что по этой причине он не может быть использован в качестве конечного дезинфицирующего средства в распределительной системе;

высокая энергоемкость и стоимость озонаторных установок. Суммарное потребление энергии станцией достигает 30-40 кВт·ч/кг озона и более, необходимо теплоснабжение станции озонирования.

Отмечается также образование в озонированной воде альдегидов. Предполагается что некоторые из них канцерогенны, их присутствие повышает возможность биологического обрастания трубопроводов, вторичного загрязнения воды микробиологическими соединениями (Драгинский... 2002). Кроме того, озон — загрязнитель первого класса опасности, его водные растворы чрезвычайно коррозионны.

Помимо обеззараживания, озон применяют для очистки сточных вод от тяжелых цветных металлов, цианидов, сульфидов, фенолов и

других органических примесей. Окисление им сероводорода и цианидов протекает по реакциям



Реакции (4.21) и (4.22) идут одновременно, но при избытке озона преобладает вторая.

Степень обезвреживания цианидов зависит от их концентрации и продолжительности озонирования. При концентрации 0,25-0,50 г/л в течение 60 мин окисляется 40-70% цианидов, а при концентрации около 0,1 г/л — до 100%.

Эффективность озонирования увеличивается, если предусматривается последующая обработка стоков на активированных углях. Об этом свидетельствует, в частности, действующая во Франции более 20 лет установка производительностью 200 м³/ч для очистки сточных вод.

Обработку хлором или озоном проводят в окислительных колоннах или контактных камерах

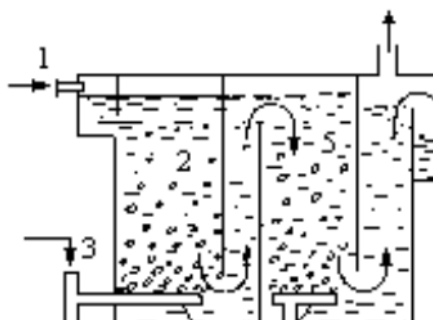


Рис. 4.15. Схема контактной камеры озонирования сточных вод:

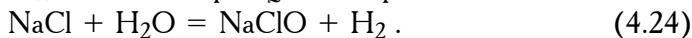
- 1 — ввод сточных вод; 2, 5 — камеры озонирования; 3 — ввод озона; 4 — металлокерамические распылительные трубы; 6 — вывод сточных вод

или контактных камерах (рис. 4.15). Если в растворе находится какой-то другой окислитель, то его сначала подают в смесители, а затем в контактный резервуар.

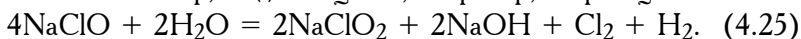
Наряду с озонированием и непосредственным хлорированием в последние годы получает распространение очистка сточных и питьевых вод с использованием гипохлорита натрия, диоксида хлора, пероксида водорода.

Обеззараживание питьевой воды гипохлоритом натрия в нашей стране было внедрено в 1997 г. (водопроводная станция пос. Пролетарский Новгородской области производительностью 3 тыс. м³/сут. Реагент получают на месте его потребления электролизом артезианской воды с концентрацией 2 г/л хлористого

натрия; используются стальные катоды и титановые, с добавками оксида рутения, аноды. Основная реакция электролиза:

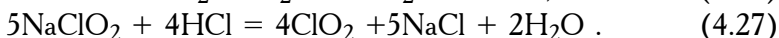
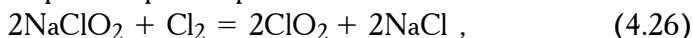


Выделяющийся водород вентиляцией удаляется в атмосферу. Раствор гипохлорита натрия самотеком по трубопроводу подается на первичное (смеситель) и вторичное (в резервуар чистой воды) хлорирование. Воду очищает активный хлор, выделяющийся, например, по реакции:



За рубежом используют станции производительностью 400 тыс. м³/сут. и более (Драгинский... 2006).

Диоксид хлора представляет собой газ желто-оранжевого цвета с резким запахом хлора. При 11°C он сжижается, при 30-50°C разлагается, при 65°C разлагается со взрывом. Как и гипохлорит натрия, диоксид хлора можно производить на месте его потребления, например при окислении хлората натрия хлором или соляной кислотой:



Выделяют следующие преимущества применения диоксида хлора в сравнении с хлором:

длительный (до 7 сут) бактерицидный эффект в водораспределительных системах, что предотвращает вторичное их загрязнение микробиологическими отложениями и микробами. Благодаря этому реагент в настоящее время используют на заключительных технологических этапах подготовки питьевой воды в больших системах водораспределения, например Дюссельдорфа, Цюриха, Брюсселя, Парижа;

весьма малые концентрации ClO_2 , применяемые для дезинфекции воды. В большинстве случаев они составляют 0,1-0,5 мг/л;

отсутствие в продуктах обработки хлорорганических соединений;

улучшение органолептических свойств воды, в том числе уничтожение дурных запахов, высокая степень окисления органики (до CO_2).

Обычная для питьевой воды схема очистки включает стадии коагуляции, первичного окисления, фильтрации и, наконец, дезинфекции с помощью диоксида хлора.

Диоксид хлора внедрен для очистки не только питьевых, но и сточных вод США (~600 установок), а также в Европе, Израиле, Японии. Применение его может быть многообразным: на одной из стадий очистки, многократно на различных стадиях в сочетании с другими дезинфекторами, окислителями и вспомогательными реагентами. Эффективно его использование для обеззараживания прошедших очистку сточных вод перед сбросом их в водоем. Он применяется и во многих отраслях пищевой, текстильной, целлюлозно-бумажной и лакокрасочной промышленности.

Недостаток диоксида хлора заключается в его взрывоопасности при концентрациях, превышающих 3,44 об.%. Кроме того, достаточно

сложны способы получения этого реагента, требующие специального оборудования и квалифицированного персонала (*Корженяк...*). Указывается также, что при его использовании образуются соединения (хлорит- и хлорат-ионы), обладающие токсичными свойствами. Стоимость диоксида хлора в 20-30 раз выше, чем хлора (*Драгинский... 2006*).

Пероксид водорода получил широкое распространение за рубежом при очистке стоков примерно 20 отраслей промышленности, в коммунальном хозяйстве, для дренажных и шахтных вод. Совместное использование пероксида водорода и ультрафиолетового излучения или их комбинации в сочетании с озоном позволяет, подобно радиационному воздействию, разрушать практически все окисляемые примеси воды.

Преимущества данного реагента в сравнении с другими окислителями (хлорноватистая кислота HClO , озон) заключаются в его относительной стабильности в водном растворе, отсутствии вторичных продуктов при деструкции и окислении органических загрязняющих веществ, возможности обработки воды в широком диапазоне температур и рН, сравнительной простоте введения в воду. По различным оценкам, до 25% производимого в мире пероксида водорода расходуется на цели охраны окружающей среды. Однако в нашей стране применению этого окислителя не уделяется должного внимания из-за недостаточно развитой базы его промышленного производства.

Показатели некоторых окислительных способов очистки даны в табл. 4.1.

Табл. 4.1

Экономические показатели некоторых методов обеззараживания воды, цент/м³ (*Денисова...*)

Метод	производительность станции, м ³ /сут		
	4000	40000	400000
Хлорирование (сжиженный хлор)	0,9	0,37	0,19
Хлорирование с последующим дехлорированием диоксидом серы	1,12	0,48	0,24
Хлорирование с последующим дехлорированием диоксидом серы и аэрацией	1,95	0,63	0,33
Хлорирование с дехлорированием на активированном угле	4,78	2,2	0,85
Хлорирование (15%-й р-р гипохлорита натрия)	1,78	0,88	0,44
Озонирование	2,0	1,05	0,78

Помимо очистки сточных вод с помощью реагентов-окислителей, используют и *термоокислительные методы*, основанные на окислении примесей при повышенной температуре и дающие значительный эффект обезвреживания. К этим методам относятся парофазное, включая каталитическое, и жидкофазное окисление. Парофазное окисление без катализатора реализуют при 800-1000°C и избытке кислорода. Жидкофазное окисление проводят кислородом воздуха при 200-300°C и давлении 10-15 МПа в течение 30-60 мин. Однако известны способы автоклавного окисления при температурах до 600°C и давлении до 25 МПа. Они предназначаются в основном для обезвреживания углеводородных примесей, не смешиваемых с водой в обычных условиях. Термоокисление используют при небольших расходах высококонцентрированных сточных вод.

4.3.4. Физико-химические

Физико-химические методы основаны на явлениях химического характера, получающих развитие под влиянием изменения термодинамических параметров (давление, объем, температура и т.д.). При этом имеют место нестехиометрические превращения одних веществ в другие, изменение их поверхностных, межфазных и иных свойств, процессы смешанного (физического и химического) характера. Таким образом, эти способы очистки базируются на совокупности взаимосвязанных явлений, пограничных между физическими и химическими.

Физико-химические методы используют для удаления примесей коллоидных размеров и растворенных. В зависимости от местных условий, их применяют на промежуточных или конечных стадиях очистки. Этим методам могут предшествовать или осуществляются после них химические (нейтрализации, окисления, восстановления и др.) и физические способы, например фильтрование. Физико-химические методы пригодны для осаждения токсичных металлов и их солей, удаления масел и суспендированных веществ, осветления стоков со снижением БПК и ХПК. Выбор конкретного способа определяется свойствами и количеством стоков. В основе каждого метода лежит соответствующий физико-химический процесс.

4.3.4.1. Коагуляция и флокуляция

Теоретические аспекты процессов коагуляции и флокуляции рассмотрены нами в «Технологиях...». Здесь отметим лишь, что эти процессы, в целом характерные для коллоидных систем, распространены,

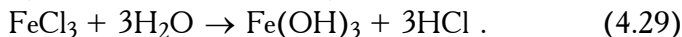
в частности, в сточных водах. Будучи в большинстве случаев лиофильными коллоидными системами суспензионного и эмульсионного типов, вредные примеси стоков могут быть достаточно кинетически и агрегативно устойчивыми и не осаждаются в течение неопределенно долгого времени. Для нарушения их устойчивости используют реагентные и безреагентные методы, общим свойством которых является снятие тем или иным способом заряда с поверхности коллоидной примеси. Развивающаяся при этом потеря агрегативной устойчивости (слияние частиц) ведет к их оседанию, т.е. к очистке стоков.

Реагентные методы

Реагентные методы предусматривают усиление коагуляции и флокуляции коллоидных токсичных веществ сточных вод определенными химическими соединениями (коагулянтами и флокулянтами). При этом, в отличие от классического смысла терминологических понятий коллоидной химии, в практике обработки воды термин «коагуляция» относят к процессам дестабилизации, а термин «флокуляция» означает последующее укрупнение нейтральных коллоидов. Как известно, в коллоидной химии коагулянты и флокулянты различают как астабилизаторы соответственно неорганических и высокомолекулярных коллоидных систем (кн. 1, разд. 2.10.4).

В качестве *коагулянтов* для очистки сточных вод используют химические вещества, из которых по экономическим соображениям наиболее часто применяют соли алюминия и железа: сульфат натрия (жидкий или сухой), алюминат натрия, смесь сульфата натрия или сульфата двухвалентного железа с известью и др. Дозы коагулянтов устанавливаются опытным путем, в зависимости от качества обрабатываемой воды и требуемой степени очистки. Обычно они составляют 100-500 г/м³ промышленных и бытовых стоков.

Действие коагулянтов основано на том, что, будучи солями сильных кислот и слабых оснований (гидроксидов алюминия и железа), перечисленные алюминий- и железосодержащие соединения способны к гидролизу, например:



Образующиеся в результате гидролиза положительно заряженные высокодисперсные с большой избыточной поверхностной энергией гидроксиды алюминия и железа обладают высокими сорбирующими свойствами, захватывают отрицательно заряженные коллоидные частицы примесей (почвы, микрофлоры и др.) и при надлежащих гидродинами-

ческих условиях оседают на дно отстойника. Назначение извести и других щелочных добавок в коагулирующих смесях — нейтрализация иных продуктов гидролиза (серной и соляной кислоты).

Необходимым условием эффективного использования коагулянтов (сокращения их расхода) являются оптимальные значения рН стоков. Для $\text{Al}(\text{OH})_3$ они составляют 4,5-7,0; для $\text{Fe}(\text{OH})_3$ — 4-6 и 8-10.

В ряде случаев в качестве коагулянтов используют катионные органические полиэлектролиты со средней концентрацией 0,5-1,0 г/м³. Их применяют в комбинации с солями металлов, что позволяет существенно снизить долю последних. Иногда катионные электролиты вводят без минеральных коагулянтов, что приводит к значительному уменьшению объема осадка.

Следует учитывать, что коагулянты, гидролизируя, сами быстро коагулируют и время их коагуляции мало (менее секунды). Наилучшие результаты очистки достигаются, если коллоидные частицы загрязнений полностью нейтрализованы еще до того, как часть коагулянта начнет образовывать осадок. Отсюда вытекает необходимость как можно более быстрого полного смешения коагулянта со стоками. Обычно для этого используют статические и механические смесители.

Статические смесители (винты, диафрагмы, конусы и т.д.) устанавливают внутри труб, создавая турбулентный поток, достаточный для мгновенного распределения коагулянта. Эти устройства очень эффективны при полном заполнении трубы жидкостью, но их результативность резко снижается при меньшем расходе воды. Кроме того, они создают значительные потери напора в трубе.

Механические смесители представляют собой высокоскоростные мешалки (пропеллерные или турбинные), устанавливаемые в специальной камере смесителя.

Методы обработки сточных вод с применением *флокулянтов* значительно ускоряют процессы агрегации осаждающихся частиц.

Флокулянты классифицируют по составу (неорганические, органические), способу получения (синтетические, природные), агрегатному состоянию (твердые и жидкие органические флокулянты), электрическому заряду (анионные, катионные, неионогенные).

К *неорганическим флокулянтам* относится активная кремнекислота, некоторые типы глин, мел, осажденные высокодисперсные карбонаты кальция, порошкообразный активный уголь, мелкий песок, кизельгур (диатомитовая земля). Активная кремнекислота является первым нашедшим промышленное применение флокулянтом, который дает наилучшие результаты в сочетании с сернокислым алюминием. До сих пор она широко применяется в процессах обработки питьевой воды.

Органические флокулянты представляют собой длинные цепочечные макромолекулы (полимеры), природные или синтетические. Они несут электрический заряд или содержат группы, способные к ионизации.

К *природным органическим флокулянтам* относятся *альгинаты* (экстракты из водорослей), крахмал, некоторые вещества на основе целлюлозы и смолы.

Природные полимеры недостаточно эффективны. Более действенны *синтетические органические флокулянты*, известные как *полиэлектролиты*. В зависимости от характера активных групп, полиэлектролиты делят на неионогенные, анионные и катионные.

Неионогенные полиэлектролиты представлены почти исключительно *полиакриламидами* (молекулярная масса 1-30 млн) — малодиссоциированными соединениями, несущими отрицательный поверхностный заряд.

Анионные полиэлектролиты имеют столь же высокую молекулярную массу, но содержат отрицательно заряженные ионные группы (карбоксильные или сульфогруппы). Наиболее известны среди этих веществ полиакриламиды, частично модифицированные содой (полиакрилат натрия).

Катионные полиэлектролиты имеют положительно заряженные катионные группы (полиэтиленамин, поливиниламин).

Флокулянты вводят в стоки после коагулянтов. Выбор типа флокулянта, а также временного интервала между введением коагулянта и флокулянта осуществляется опытным путем.

При использовании твердых органических флокулянтов для приготовления рабочих растворов необходимо применять смесители. Жидкие флокулянты можно смешивать достаточно медленно. Концентрация рабочих растворов при добавлении в воду составляет 0,05-1,0%, время перемешивания 20-120 с.

После введения рабочего раствора флокуляцию проводят в камере хлопьеобразования в течение 5 мин при медленном перемешивании лопастными горизонтальными или вертикальными мешалками, исключая разрушение образующихся хлопьев. К этому же стремятся при подаче стоков из камеры хлопьеобразования в зону отстаивания, ограничивая скорость поступления в нее потока величинами 0,2-1,0 м/с.

Масштабы применения коагулянтов существенны. Так, например, Россия, Западная Европа, США ежегодно производят по 1 млн т сульфатных коагулянтов. Однако, несмотря на широкую распространенность, реагентные методы имеют крупный недостаток. Расчеты показывают, в частности, что минимальная растворимость гидроксидов

многих тяжелых металлов превышает их ПДК в водоемах рыбохозяйственного назначения в 10-11000 раз, хозяйственно-питьевого и культурно-бытового назначения до 1100 раз. Таким образом, реагентные методы очистки в принципе не обеспечивают достижения ПДК во многих случаях (Оценка...).

Недостаток реагентных методов коагуляции состоит также в повышении содержания солей в очищенной воде, что становится особо существенным при организации замкнутых циклов водоснабжения. При высоком солесодержании сточных вод предпочтительнее использовать безреагентные электрохимические методы.

Безреагентные электрохимические методы (электро- и гальвано-коагуляция, электрофлотация)

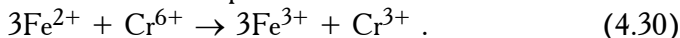
Электрокоагуляция. Очистка промышленных стоков этим способом основана на их электролизе с использованием металлических (стальных или алюминиевых) анодов, подвергающихся электролитическому растворению. Как следствие, вода обогащается соответствующими ионами, образующими затем в среде с рН 5-9 высокодисперсные гидроксиды железа и алюминия, с помощью которых и осуществляется процесс коагуляции.

Некоторые показатели процесса электрокоагуляции: плотность тока 0,6 А/дм², напряжение 10-18 В, продолжительность контакта сточных вод с электрическим полем 10-15 с, расход электроэнергии 0,4-0,5 кВт·ч/м³ стоков, скорость движения воды 0,5 м/с.

Помимо электролитического растворения, на электродах протекает еще ряд химических превращений, которые весьма различны, в зависимости от видов электролита и материалов электрода. В общем случае их можно свести к анодному окислению и катодному восстановлению. Так, на аноде выделяется кислород (продукт разрядки гидроксильных ионов воды) и хлор (разрядка ионов хлора — продукта диссоциации солей соляной кислоты), а также окисляются некоторые органические вещества сточных вод. На катоде удаляется газообразный водород (разрядка ионов водорода воды) и восстанавливаются некоторые органические вещества. Образовавшиеся пузырьки частично закрепляются на загрязнениях и флотируют их на поверхность, что способствует дополнительной очистке стоков. Поэтому процесс электрокоагуляции иногда называют *электрокоагуляционно-флотационным*.

В настоящее время электрокоагуляцию как способ очистки стоков используют предприятия машиностроения и приборостроения, химические, металлургические и другие для удаления ряда примесей (циани-

дов, шестивалентного хрома, ионов тяжелых цветных металлов, нитро-соединений, спиртов, аэроокрасителей и т.д.). В частности, при очистке от ионов цветных металлов, например хрома, ионы двухвалентного железа, образующиеся при анодном растворении стального электрода, восстанавливают ионы более электроположительных металлов:



Одновременно происходит гидролиз ионов железа с образованием нерастворимых гидроксидов двух- и трехвалентного железа, а также, в некоторых случаях, и примеси, в нашем примере — $\text{Cr}(\text{OH})_3$. Гидроксиды из электролита удаляют, в частности центрифугированием.

Сдерживающим фактором внедрения электрокоагуляции служат высокие расходы листового металла (алюминия и железа) и электро-энергии. Ее использование целесообразно для концентрированных органических и неорганических загрязнений при небольших объемах производственных сточных вод.

Одним из возможных направлений улучшения показателей этого способа, возможно, станет применение режима прерывистой коагуляции. Показано, например, что при соотношении периодов подачи и отключения электрического тока, равном единице, может быть получено сокращение энергопотребления и расхода металла в два раза. При этом эффект очистки сопоставим с достигаемым при непрерывной коагуляции (разность 5%), а ее себестоимость снижается на ~20% (Большаков).

Применение нерастворимых электродов — суть *электрофлотационного способа* очистки, в котором основную роль при удалении примесей играют газообразные продукты электролиза воды, пузырьки которых поднимают частицы загрязнений на поверхность. Этот способ в сравнении с электрокоагуляцией отличается большими плотностью тока (порядка 2А/дм^2) и продолжительностью контакта жидкости с электродами (10-20 мин), расход электроэнергии около $1\text{ кВт}\cdot\text{ч/м}^3$. Установки электрофлотации производительностью $10\text{-}15\text{ м}^3/\text{ч}$ сточных вод обычно являются однокамерными, а при большей пропускной способности — двухкамерными горизонтального или вертикального типов.

В качестве нерастворимых анодов используют титан с покрытием на основе рутения и марганца в кислой среде и оксидов кобальта — в щелочной. Материал катода — нержавеющая сталь, графит.

К преимуществам электрофлотации относят высокую степень дисперсности пузырьков (20-80 мкм), возможность одновременного извлечения примесей, имеющих различный фазово-дисперсный состав, плавное регулирование скорости процесса за счет изменения степени насыщения жидкости пузырьками газа, меньшую, чем в отстойниках, влажность шлама (92-95%).

Электрофлотационный способ, разработанный в 1988 г. в Российском химико-технологическом университете, к 1996 г. был внедрен уже на 20 заводах. Организован выпуск технологического оборудования производительностью до 80 м³/ч очищаемых жидкостей (Колесников...).

Гальванокоагуляция основана на использовании эффекта работы короткозамкнутой гальванической пары Fe/C или Al/C, помещаемой в очищаемый раствор в аппарате барабанного типа. Переменный контакт элементов гальванопары (железа и кокса или замещающих их частиц чугуна) между собой, раствором и кислородом воздуха, обусловленный вращением барабана, увеличивает скорость растворения железа в 5-10 раз, обеспечивает быстрое его окисление до трехвалентного без наложения тока от внешнего источника, который необходим при электрокоагуляции. За счет разницы электрохимического потенциала железо поляризуется анодно и переходит в раствор. Кокс поляризуется катодно, поэтому защищен от химического растворения, однако возможно его небольшое механическое истирание. Таким образом, в основе процесса гальванокоагуляции лежит искусственно интенсифицируемый процесс коррозии.

В сравнении с электрокоагуляцией гальванокоагуляция имеет более простое аппаратное оформление, не требует прямых энергозатрат, позволяет использовать для очистки отходы производства, например железный и алюминиевый скрап.

Показана возможность использования гальванокоагуляции для очистки сточных вод от тяжелых металлов (меди, цинка, никеля, мышьяка), различных анионов, ПАВ. Степень удаления меди составляет 100%, цинка и никеля — 85 и 75% соответственно, сульфатов — 60-90%. В настоящее время данный метод используют как самостоятельный процесс в металлургии, радиоэлектронике, приборостроении, легкой и пищевой промышленности.

4.3.4.2. Экстракция

Экстракция — один из наиболее распространенных методов концентрирования и извлечения растворимых примесей из воды и водных растворов. В принципе, он отличается большой универсальностью, так как экстрагировать удастся почти все химические элементы и большинство классов соединений.

При очистке сточных вод рассматриваемый метод обычно используют для извлечения органических веществ (фенолов, спиртов, жиров и т.д.), применяя органические экстрагенты, малорастворимые в воде (бензол, четыреххлористый углерод, бутилацетат). Коэффициенты распределения

в зависимости от свойств рафината, экстрагента и экстрагируемого вещества могут достигать нескольких десятков и даже сотен единиц.

Экстракцией называют процесс распределения растворенного вещества между двумя несмешивающимися жидкими фазами с преимущественным его переходом в одну из них в соответствии с коэффициентом распределения (кн. 1, разд. 2.6.6.2). Жидкость, из которой извлекают (экстрагируют) вещество, называется *рафинатом*, а жидкость, в которую это вещество переходит, — *экстрагентом* (*растворителем, экстрагирующей фазой*).

По способу реализации различают экстракцию непрерывную и периодическую, прямоточную и противоточную, одно- и многоступенчатую.

При *прямоточной экстракции* рафинат и экстрагент после смешения перемещаются в одном направлении до зоны отстаивания.

При *противоточной экстракции* рафинат и экстрагент движутся в противоположных направлениях.

При *одноступенчатой экстракции* проводят однократное смешение рафината и экстрагента. *Многоступенчатую экстракцию* осуществляют неоднократным введением экстрагента в рафинат. Она наиболее распространена. Различают два основных вида многоступенчатой экстракции: противоточную и прямоточную. В прямоточном варианте на все ступени экстракции подают только чистый растворитель. В противоточном оформлении экстрагент i -й стадии экстракции отправляют на стадию $(i-1)$. Таким образом, исходный рафинат при входе на очистку встречается с наиболее отработанным растворителем, а при выходе промывается его чистой порцией.

Относительное количество φ экстрагируемого вещества, остающееся в исходной фазе, при n -кратной прямоточной экстракции и коэффициенте L экстракции:

$$\varphi = \frac{1}{(1 + L)^n} \quad (4.31)$$

При противоточной экстракции :

$$\varphi = \frac{L - 1}{L^{n+1} - 1} \quad (4.32)$$

Анализ этих формул показывает следующее. При равном расходе экстрагента замена одноступенчатого варианта многоступенчатым существенно улучшает полноту очистки рафината или, при той же степени очистки, снижает расход экстрагента. Основная часть примесей может быть извлечена относительно малым числом n ступеней, тем

меньшим, чем выше величина коэффициента распределения. Увеличение n сверх 3 незначительно повышает полноту извлечения. В противоточном исполнении можно получить экстрагент, более богатый по извлекаемому компоненту, при равном его расходе в сравнении с прямоточной экстракцией добиться большей степени очистки. Очевидно также, что для повышения полноты извлечения следует выбирать экстрагент с высоким коэффициентом распределения.

Для интенсификации процесса экстракции смешение сточных вод с экстрагентом осуществляют в наполненных насадками типа колец Рашига одной или нескольких экстракционных колоннах. Количество последних соответствует числу ступеней очистки. В противоточном варианте, если плотность экстрагента меньше, чем стоков, его подают снизу, а стоки — сверху и выпускают их из нижней части колонны. При обратном соотношении плотностей экстрагент подают сверху, а стоки — снизу.

В ряде случаев отработанный экстрагент подвергают регенерации с целью извлечения примесей и повторного использования растворителя. Для регенерации применяют методы дистилляции, реэкстракции, кристаллизации и т.д.

Частным методом экстракции является *флотоэкстракция*, когда экстрагирование сочетают с флотацией. В этом случае через очищаемый раствор пропускают пузырьки газа, которые, в рамках обычного механизма флотации (кн. 1, разд. 5.3.4), поднимают примесь вверх к экстрагирующей фазе. При пересечении пузырьком межфазной границы он лопается и примесь переходит в экстрагент.

В ряде случаев флотоэкстракция (*пенная сепарация*) более эффективна, чем обычная. Последняя основана на диффузионном распределении экстрагируемого вещества между двумя фазами, при этом максимальное количество примеси извлекается при достижении ее равновесного распределения. Теоретически это должно иметь место и при флотоэкстракции. Однако в реальном процессе при заданном потоке пузырьков количество перенесенного ими экстрактива существенно превышает обратный поток сверхравновесной массы извлеченного вещества, обусловленный лишь диффузией. Поэтому пенная сепарация при достаточной ее длительности позволяет очистить жидкую среду в большей степени, чем обычная экстракция.

4.3.4.3. Сорбция

Сорбционная очистка основана на процессах адсорбции из сточных вод растворенных и взвешенных в них примесей твердыми адсорбентами. Общие представления об адсорбции даны в «Технологиях...».

Сорбция является одним из наиболее рациональных методов глубокой очистки сточных вод. Она особенно эффективна в замкнутых циклах природопользования. Сорбция результативна при извлечении неэлектролитов и многих органических веществ, в том числе биохимически устойчивых и не удаляемых другими методами. В частности, от неэлектролитов воду можно очистить практически до нулевых концентраций при любых их исходных содержаниях, в том числе весьма малых, когда другие методы становятся малопригодными. Вместе с тем сорбционные методы неэффективны для очистки от неорганических соединений-электролитов и низших одноатомных спиртов. Исходя из особенностей сорбции, определились и традиционные области ее применения: очистка сточных вод химических и нефтехимических производств.

В качестве сорбентов могут быть использованы практически все мелкодисперсные твердые вещества, обладающие развитой поверхностью, в том числе опилки, зола, глина, торф, шламы, коксовая мелочь, сапропель, отходы сельскохозяйственного производства, компост опавших листьев и т.д. Однако наиболее эффективны активированные угли различных марок (АГ-2, БАУ, АР-3, СКТ и др.) с полной емкостью 70-150 см³/100 г и насыпной массой 260-600 кг/м³.

При организации процесса очистки различают сорбцию в статических и динамических условиях.

При *сорбции в статических условиях* производится интенсивное перемешивание обрабатываемой воды с сорбентом и последующее их разделение при отстаивании, фильтрации и т.п. В этом варианте сорбция является периодическим процессом и получила наибольшее распространение. Последовательным введением чистых порций сорбента в очищаемую воду, т.е. прямоточной многоступенчатой экстракцией, можно очистить ее от примесей до любой заданной концентрации. Еще более экономично использование сорбента в противоточной многоступенчатой сорбционной установке. В ней чистый сорбент вводится один раз на последней ступени очистки и затем перекачивается из каждой последующей ступени на предыдущую.

Сорбция в динамических условиях — непрерывный процесс. Она имеет большие технологические, эксплуатационные и экономические преимущества по сравнению со статическими условиями, позволяя полнее использовать емкость сорбента. Ее реализуют в аппаратах различных конструкций с неподвижным и подвижным слоями адсорбента.

Наиболее прост насыпной фильтр, представляющий колонну с неподвижным слоем сорбента, через который фильтруется сточная вода. Скорость фильтрования зависит от концентрации примесей и составляет 1-12 м/ч при крупности сорбента 1,5-5 мм. Предпочтительнее фильтрование снизу вверх, так как в этом случае происходит рав-

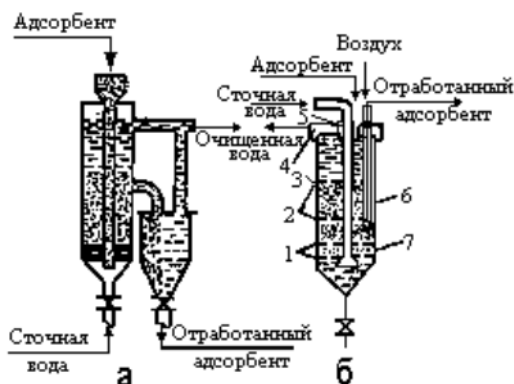


Рис. 4.16. Адсорберы непрерывного действия с кипящим слоем активного угля:

а — однорядный; б — с секционированием слоя адсорбента; 1 — опорные решетки; 2 — распределительные решетки; 3 — адсорбент; 4 — желоб для очищенной воды; 5 — питающая воронка сухого дозирования угля; 6 — эрлифт; 7 — слой гравия

грязняющее вещество вследствие полного исчерпания их адсорбционной емкости. Обычно сорбционные установки представляют собой несколько параллельно работающих секций, состоящих из 3-5 последовательно расположенных фильтров, что позволяет выключать на регенерацию головной фильтр после его предельного насыщения.

Фильтры с неподвижным слоем эффективны при очистке стоков в тех случаях, когда при последующей регенерации сорбента выделяются относительно чистые и концентрированные продукты сорбции.

Применяют также адсорберы непрерывного действия с кипящим (подвижным) слоем активированного угля (рис. 4.16).

Поскольку активированный уголь дорог, разработаны методы его регенерации: паром, термические и химические.

4.3.4.4. Ионный обмен

Ионный обмен основан на частном случае адсорбции, на так называемой *обменной адсорбции*. Последнее имеет место в тех случаях, когда на поверхности адсорбента, приводимой в контакт с раствором

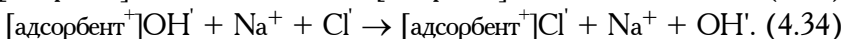
номерное заполнение всего сечения колонны и относительно легко вытесняются пузырьки воздуха или газов, попадающих в слой сорбента вместе с водой. По мере прохождения очищаемой жидкости через загрузку активного угля концентрация примеси в стоке снижается. На выходе из фильтра она составляет весьма небольшую величину. Так же постепенно, начиная от входного сечения, увеличивается насыщенность сорбента адсорбатом. Со временем сначала первые, а затем и последующие слои загрузки перестают извлекать из воды за-

электролита, уже адсорбирован другой электролит, что приводит к обмену ионов между поверхностным слоем адсорбента и жидкости. При этом адсорбент, поглощая определенное количество каких-либо ионов, одновременно выделяет в раствор эквивалентное количество других ионов того же знака, вытесненных с поверхности.

Ионный обмен происходит не только с примесными ионами поверхности адсорбента, но и с его диссоциированными молекулами. В некоторых случаях в подобных процессах обмена ионов принимают участие глубинные слои адсорбента, что, в строгом смысле, уже является абсорбционным процессом. Это резко повышает емкость поглощения соответствующего иона из раствора.

Обменная адсорбция имеет ряд особенностей. Во первых, она *специфична*, т.е. к обмену способны только определенные ионы, и на нее сильно влияет природа как твердой фазы, так и адсорбированного иона. Во вторых, обменная адсорбция *не всегда обратима*. В третьих, она протекает *медленнее*, чем адсорбция неэлектролитов при обычной сорбции, особенно в тех случаях, когда в обмене участвуют ионы, находящиеся в глубине адсорбента. И наконец, при обменной адсорбции может происходить *изменение рН среды*. Если адсорбент отдает водородный ион в обмен на другой катион, то рН среды уменьшается, и она подкисляется. Такой адсорбент называется *кислотным*. Если адсорбент отдает в раствор гидроксильный ион в обмен на анион, то раствор подщелачивается, а адсорбент называют *основным*.

В обоих этих случаях обмен ионов можно изобразить следующей схемой:



Адсорбенты, способные к ионному обмену, получили название *ионитов*. Их, в зависимости от характера ионного обмена, подразделяют на *катиониты* (катионный обмен) и *аниониты* (анионный обмен). Количество ионов (в г-экв.), обменивающегося с единицей объема или массы ионита, называется *обменной емкостью*.

Иониты по химическому составу подразделяют на неорганические и органические.

Неорганические иониты могут быть представлены оксидами, гидроксидами многовалентных элементов, а также солями гетерокислот, ферроцианидов. Неорганические иониты, в зависимости от рН раствора, часто обменивают одновременно и катионы, и анионы, т.е. возможна *молекулярная сорбция электролитов*. Из этого класса веществ широко известен гидроалюмосиликат натрия *пермутит* $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$. Его

применяют для умягчения воды за счет обменной реакции ионов натрия пермутита с ионами кальция воды.

Из органических наибольшее распространение в последнее время получили ионитовые смолы.

Ионообменные смолы представляют собой высокополимерную пространственную сетку углеводородных цепей (каркас), в которой закреплены активные ионогенные группы атомов, обуславливающие способность к обмену ионов.

Преимущества ионообменных смол перед другими ионитами заключаются в их высокой механической прочности, химической стойкости и большой сорбционной (обменной) емкости.

К распространенной катионитовой разновидности смол относятся сульфоуголь, КУ-1 и КУ-2 с размером зерен 0,3-1,5 мм и объемной емкостью по катиону 300-800 г-экв./м³. Из анионитов широко используют АН-2ФН, АН-18-8 и АВ-17-8 с размером зерна 0,2-1,6 мм и объемной емкостью по аниону 700-1000 г-экв./м³. Разработаны также синтетические смолы селективного действия, пригодные для разделения аминокислот и амфотерных элементов. Получили известность иониты с оптически активными группировками, с помощью которых можно разделять оптические изомеры.

Большинство ионитов выпускаются и хранятся во влажном состоянии или под слоем воды. При высыхании ионит перед загрузкой замачивают в 20%-м растворе хлористого натрия.

Поскольку ионообменные смолы пока дефицитны и дороги, определенный интерес представляют разработки по использованию природных материалов, обладающих ионообменными свойствами. В этом направлении имеются перспективные исследования, связанные с применением торфа. Торф, химически модифицированный, например раствором щелочи натрия, близок по катионообменным свойствам к синтетическим ионитам. Его двадцатикратная регенерация не снижает объемной емкости. При ухудшении рабочих характеристик торф используют в качестве топлива. Особенно перспективно применение гранулированного торфа для удаления ионов тяжелых цветных металлов (свинца, цинка, никеля, меди, хрома) со степенью их извлечения 92-99%.

Для ионообменной очистки сточных вод применяют фильтры периодического или непрерывного действия. Фильтр непрерывного действия представляет собой закрытый цилиндрический резервуар с расположенным у днища щелевым дренажным устройством, обеспечивающим равномерный отвод воды по всему сечению фильтра со скоростью 20-30 м/ч. Высота слоя загрузки ионита составляет 1,5-2,5 м. На работу фильтра отрицательно влияют взвешенные частицы, масла,

ПАВ в подаваемой сточной воде, поэтому ее предварительно необходимо от них очищать.

В ряде стран применяются ионообменные колонны кассетного типа. Отработанные кассеты направляются на централизованный узел регенерации и заменяют новыми с регенерированными смолами без длительных перерывов в работе ионообменной установки.

Регенерация ионитов достаточно проста. При их восстановлении используется 2-4%-й раствор едких щелочей (для анионитов) или 2-6%-й раствор минеральных кислот, чаще всего соляной и серной (для катионитов). Восстановленная обменная способность составляет при этом 60-100%. Образующиеся при регенерации концентрированные растворы солей (элюаты) содержат также некоторое количество свободных кислот и щелочей и используются для технических целей или подлежат дальнейшей переработке. Отмывка ионита от регенеранта производится водой при скорости фильтрации 5-7 м/ч. Хорошая способность ионита к регенерации является одним из главных его достоинств.

Ионообменные методы дают возможность выполнять глубокую очистку стоков до ПДК с последующим их использованием в технологических процессах или системах оборотного водоснабжения. Иониты применяют в энергетической, химической, пищевой, фармацевтической промышленности и особенно широко — на предприятиях черной и цветной металлургии, машиностроения и металлообработки. С их помощью извлекают соединения фосфора, мышьяка, хрома, тяжелых цветных металлов, ртути, радиоактивных веществ, ПАВ. Они позволяют получить выделенные металлы в виде относительно чистых и концентрированных солей как отдельных технологических процессов и операций (цинкование, меднение, хромирование и т.п.), так и целых участков, цехов, в стоках которых содержится обширный спектр ионов металлов. Предпочтителен первый вариант, позволяющий получить концентрированные растворы отдельных металлов при регенерации ионитов, что облегчает их последующую переработку или использование.

Наряду с бесспорными достоинствами ионитовая обработка имеет и определенные недостатки: большое количество химикатов для регенерации, значительные объемы воды на отмывку, что создает большие циркуляционные нагрузки. Переработка элюатов во многих случаях сложна и неэкономична, эти растворы приходится обезвреживать с помощью реагентов, расход которых также велик. Кроме того, с нейтрализованными элюатами ионообменной установки в водоемы попадает значительно большее количество солей, чем при сбросе нейтрализованных сточных вод, не подвергающихся ионитовой очистке.

4.3.4.5. Мембранные методы

Мембранными называют методы, основанные на процессах массопереноса через полупроницаемые перегородки, в результате которых происходит отделение примесей от растворителей или дисперсионной среды. Их достоинство состоит в том, что они, в отличие от ионного обмена, не имеют стадии регенерации ионитов, требующей значительных количеств кислоты и щелочи и создающей проблему утилизации отходов.

К числу мембранных относятся диализ и баромембранные методы.

Последние лишь условно можно отнести к физико-химическим, поскольку протекающие при этом процессы выделения загрязнителей из жидких фаз имеют по существу физический характер. Однако с бесспорно физико-химическим процессом диализа их объединяет использование полупроницаемых перегородок.

Диализ

При *диализе* отделяют растворенные ионные примеси от примесей коллоидных размеров. Растворенное вещество проходит через мембрану, а более крупные коллоидные частицы не способны проникать через полупроницаемую перегородку и остаются в виде очищенного коллоидного раствора.

Материал полупроницаемой перегородки в зависимости от системы, подвергаемой диализу, может быть различным (бычий пузырь, пергамент, коллодий, целлофан).

Диализ значительно ускоряется наложением электрического тока. Такой вариант называется *электродиализом* и является наиболее распространенным в промышленности методом диализа.

Электродиализ используют для удаления из малоконцентрированных сточных вод минеральных солей, в том числе тяжелых цветных металлов, с целью повторного использования обессоленной воды для технических нужд и возможной утилизации солей. Пригоден он и для переработки высококонцентрированных сточных вод с регенерацией из них ценных продуктов.

В настоящее время широко используют электродиализ с применением ионитовых мембран. Наиболее распространены гетерогенные ионитовые мембраны, представляющие собой тонкие пленки, изготовленные из измельченной в порошок ионообменной смолы, в который также в виде порошка добавляют пластичный неэлектропроводный материал (полиэтилен, полистирол, фторопласт и др.). Кроме того, существ-

вуют гомогенные ионитовые мембраны. Ионитовые мембраны имеют ряд преимуществ: избирательную проницаемость (селективность), высокую электропроводность, низкую водопроницаемость, значительное диффузионное сопротивление.

Электродиализ ведут в многокамерных аппаратах (электродиализаторах), которые разделены чередующимися катионитовыми и анионитовыми мембранами (рис. 4.17).

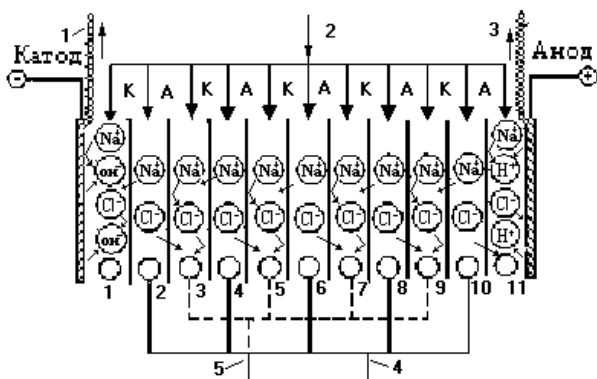


Рис. 4.17. Схема процесса электродиализа (цифры у кружков — номера камер):

А — анионитовые мембраны; К — катионитовые мембраны; 1 — выход газообразного водорода; 2 — подача сточной воды; 3 — выход газообразных кислорода и хлора; 4 — выпуск обессоленной воды; 5 — выпуск концентрированного рассола

Под воздействием постоянного тока катионы, двигаясь к катоду, проникают через катионитовые мембраны, но задерживаются анионитовыми, а анионы, перемещаясь в направлении анода, проходят через анионитовые мембраны, но задерживаются катионитовыми. В результате этого из одного ряда камер, например четных, ионы обоих знаков выводятся в другой, смежный ряд камер. Очищенная от солей вода выпускается по одному коллектору, а рассол — по другому. На 100-200 камер одного аппарата устанавливаются общий катод и анод, что многократно сокращает расход электроэнергии на разряд ионов на соответствующих электродах. Материал электродов обычно платинированный титан. Оптимальная концентрация солей в очищаемых стоках — 3-8 г/л, а после очистки — на уровне 300 мг/л.

В то же время неионизированные молекулы (в особенности органических веществ) и коллоиды остаются в обработанной воде. Отсюда следует, что наряду с основной областью применения электродиализа (получе-

ние из солоноватых вод питьевой воды с низким содержанием солей) он также имеет предпочтение при обессоливании коллоидных и органических растворов, в частности с целью деминерализации сывортки.

Отечественные электродиализные аппараты разделяют на два типа (прокладочные и лабиринтные), оба фильтр-прессной конструкции, но различающиеся направлением оси электрического поля. В аппаратах прокладочного типа она горизонтальна, а в лабиринтных — вертикальна. Их производительность достигает $25 \text{ м}^3/\text{ч}$, напряжение на электродах составляет 400-500 В при расстоянии между мембранами 1-2 мм. Съем соли на аппаратах за один проход составляет 30-70%. В системе водоснабжения г. Рияд (Саудовская Аравия) электродиализная станция очищает до 2,5 тыс. $\text{м}^3/\text{ч}$ солоноватых вод.

При организации технологических электродиализных систем очистки необходима тщательная предочистка: от взвешенных частиц — введением коагулянтов, а от органических веществ — пористыми адсорбентами (активированный уголь и др.).

Баромембранные методы

Наряду с электролизом к числу мембранных относятся методы, в которых массоперенос осуществляется под влиянием градиента давления. Они получили название *баромембранных*. В зависимости от радиуса пор мембран, эти методы разделяют на: обратный осмос (гиперфильтрацию) — радиус пор мембран менее 3 нм; ультрафильтрацию (3-100 нм), микрофильтрацию (0,1-10 мкм).

Природа возникновения градиента давления в баромембранных методах одинакова. Рассмотрим ее на примере осмотического давления.

Осмотическое давление возникает, когда между чистым растворителем (водой) и раствором (например, сахара) устанавливают полупроницаемую мембрану, которая пропускает растворитель, но задерживает растворенное вещество.

Хотя вода проникает через такую полупроницаемую перегородку в обе стороны, скорость ее диффузии, например из наружного сосуда во внутренний (с раствором), всегда больше, чем в обратном направлении. Это явление, т.е. самопроизвольный переход растворителя в раствор, отделенный от него полупроницаемой перегородкой, называется *осмосом*.

Причины осмоса недостаточно ясны. Его можно объяснить, в частности, тем, что концентрация молекул H_2O в чистой воде выше, чем в водном растворе, и поэтому возникает ее преобладающий диффузионный поток в последний. Возможно, что молекулы H_2O в растворе частично связываются молекулами растворенного вещества, гидратируя

их или другим образом взаимодействуя с ними. При этом осмос не зависит в явной форме от вида растворенного вещества и растворителя. Решающее значение имеет лишь концентрация раствора, вернее — число частиц растворенного вещества в единице объема раствора.

Переход растворителя в раствор сопровождается увеличением объема последнего и, при его нахождении в достаточно узкой трубке, заметным возрастанием высоты столбика раствора и повышением гидростатического давления, под которым находится раствор. Следствием этого становится возрастание скорости обратного перехода молекул воды через полупроницаемую мембрану. Наконец, при некоторой высоте столба раствора в трубке скорости прямого и обратного перехода воды через мембрану сравняются и подъем жидкости в трубке прекратится. Давление, которое отвечает такому равновесию, может служить количественной характеристикой явления осмоса и называется осмотическим. Таким образом, *осмотическое давление* равно давлению, которое нужно приложить к раствору, чтобы привести его в равновесие с чистым растворителем, отделенным от него полупроницаемой перегородкой.

Установлено, что в достаточно разбавленных растворах осмотическое давление π прямо пропорционально концентрации C частиц растворенного вещества и абсолютной температуре T :

$$\pi = CRT, \quad (4.35)$$

где R — универсальная газовая постоянная.

В частности, для раствора сахара с концентрацией 1 моль/л осмотическое давление при 0°C равно 2,5 МПа.

Если к раствору соли приложить гидростатическое давление, превышающее осмотическое, то чистая вода начнет протекать в направлении, противоположном описанному выше, т.е. из раствора, а растворенное вещество будет задерживаться мембраной. Явление перехода растворителя из раствора через полупроницаемую перегородку при давлениях, превышающих осмотическое, получило название *обратного осмоса*. Его применяют для отделения примесей с молекулярной массой менее 500.

Скорость переноса воды через мембрану в процессе обратного осмоса прямо пропорциональна эффективному давлению, т.е. разности между приложенным и осмотическим давлением. Чтобы получить удовлетворительную скорость фильтрования, необходимо прилагать давления, намного превосходящие осмотическое. Практически они достигают 5-10 МПа.

При обратном осмосе задерживается 90-99% всех растворенных неорганических соединений, 95-99% органических веществ и 100%

мельчайших коллоидных примесей (бактерий, вирусов, коллоидной кремниевой кислоты и т.д.).

В настоящее время используют мембраны двух основных типов: из ацетицеллюлозы и из ароматических полиамидов. Толщина пленок составляет 0,1-0,2 мкм, радиус пор мембран, как отмечалось, менее 3 нм.

Мембраны являются основной частью технологических элементов, называемых *модулями*. Простейшая система, применяемая на практике, состоит из насоса высокого давления и модуля, соединенных последовательно. Сточная вода насосом подается на мембрану, чистая вода (фильтрат) проходит через нее, а сбросная вода удаляется через выпускной клапан.

В обратноосмотическую установку включают несколько модулей, которые собирают параллельно или последовательно.

При параллельной схеме все модули работают в одинаковых условиях: при одном и том же давлении и коэффициенте выхода фильтрата (отношение расходов очищенной и поданной вод). Такая система пригодна для большинства установок низкой производительности. Защита мембран и насосов высокого давления от загрязнения взвешенными веществами осуществляется фильтрами патронного типа.

Последовательное соединение модулей применяют, чтобы увеличить коэффициент выхода фильтрата. В данном случае раствор концентрата из первой ступени служит исходной водой для второй ступени. В двух-трехступенчатых установках обеспечивается коэффициент выхода фильтрата 70-90%.

В настоящее время известны четыре вида конструкций обратноосмотических аппаратов: а) типа фильтр-пресса; б) с трубчатыми мембранами; в) с мембранами, свернутыми в рулон; г) с мембранами в виде полых волокон.

Основной областью применения обратного осмоса является опреснение солоноватых (морских) и шахтных вод, получение ультрачистой воды. В последнее время его все больше используют для очистки промышленных сточных вод. Трубчатые конструкции для очистки сточных вод электростанций достигают общей площади 7000 м² и производительности 750 м³/ч стоков, оснащены фильтрами с длиной и диаметром соответственно более 5 и 2 м (Очистка....). Расширяется использование метода для удаления тяжелых цветных металлов из стоков гальванических производств. Установлено, что обратноосмотические мембраны задерживают цинк, никель, медь и хром шестивалентный на 96-99%. Способ нашел также применение для удаления некоторых низкомолекулярных органических веществ, ПАВ, красителей, особенно ценных или весьма опасных (радиоактивных) ионов металлов. Полу-

ченный концентрированный раствор зачастую является конечным продуктом или утилизируется.

В мире насчитывается свыше тысячи различных установок обратного осмоса. Их производительность — от $4 \cdot 10^3$ до $378 \cdot 10^3$ м³/сут. Наиболее мощная установка сооружена в г. Юм (США).

Ультрафильтрация, другой баромембранный способ, имеет много общего с обратным осмосом, в частности в конструктивном оформлении. Различия обусловлены более крупными (3-100 нм) радиусами пор мембран для ультрафильтрации. Это предопределяет меньшее давление, прилагаемое при ультрафильтрации (до 1,5 МПа) и его использование для отделения примесей с молекулярной массой более 500, т.е., как правило, высокомолекулярных соединений.

До недавнего времени большую часть мембран изготавливали из относительно дешевых полимерных материалов, производимых по отлаженной технологии. Однако им присущи недостатки: низкая механическая прочность, малая химическая стойкость, возможность разрушения активного слоя мембран микроорганизмами, узкий диапазон рабочих температур.

В последние годы получили распространение мембраны из неорганических материалов (США, Япония, Франция). Для их производства используют керамику и металлокерамику, нержавеющую сталь, оксиды алюминия, циркония, титана, сплавы никеля и т.п. К достоинствам неорганических мембран относятся высокие рабочие температуры, химическая, термическая, радиолитическая, биохимическая стойкость, значительная механическая прочность, многолетний срок эксплуатации, возможность стерилизации водяным паром.

Наиболее распространенной формой мембран является трубчатая. Во Франции их выпускают со следующими характеристиками: длина трубок 1,2 м; наружный диаметр 0,01 м, толщина 0,0002 м, поверхность модуля, в зависимости от числа трубок, 0,02-5,73 м². Общая поверхность модульных конструкций может составлять сотни квадратных метров. Температура разделяемых смесей достигает 150°C. Изготавливают также мембраны дисковой и сотовой форм.

Степень выделения маслопродуктов, свободных и связанных жиров при использовании неорганических мембран достигает 99,8% (Yano).

В настоящее время ультрафильтрацию применяют для: осветления вин и соков; разделения систем белок — соли (плазма крови); извлечения из молока белка, солей и сахара (при изготовлении жидких сыров); выделении ферментов и т.п. При очистке промышленных сточных вод ультрафильтрацию также обычно используют для удаления органических примесей: пигментов, окрасочных смол, технических ма-

сел, жирных кислот, фекалий. Однако известно применение метода для удаления неорганических частиц, например кремния.

В целом, обратный осмос и ультрафильтрация обладают существенными преимуществами в сравнении с традиционными методами: отсутствуют реагенты; энергозатраты невелики; установки просты и компактны, легко автоматизируются; не требуется квалифицированный персонал; фильтрат достаточно чист для подачи в оборотную систему водоснабжения; сконцентрированные вещества легче утилизировать или уничтожать.

Микрофильтрация в последнее время начинает внедряться для биохимической очистки стоков (разд. 4.3.5).

Еще более широкое применение баромембранной технологии, в особенности обратного осмоса, затруднено необходимостью использовать высокие внешние давления, достигающие 5-10 МПа.

4.3.4.6. Флотация

Этот способ рассматривается как один из основных в обогащении полезных ископаемых. Значительное распространение флотация получила и применительно к очистке сточных вод, в частности содержащих ПАВ, нефть, нефтепродукты, волокнистые материалы, т.е. для удаления коллоидных частиц. В отличие от обогащения полезных ископаемых, флотореагенты при очистке стоков обычно не применяют.

Флотацию можно использовать и для удаления растворенных веществ. Имеется в виду ионная *флотация*, получившая широкое распространение для извлечения ионов цветных металлов и предусматривающая введение ПАВ. Последние адсорбируются на границе раздела фаз сточная вода — воздух, т.е. концентрируются в пенном слое. Гидрофильная часть молекул ПАВ представляет собой активный центр, взаимодействующий с ионами металла в растворе и извлекающий их в пенный слой.

К достоинствам флотации относятся возможность очистки стоков от примесей при весьма низких их концентрациях, простое аппаратное оформление, малые производственные площади, занимаемые установками, небольшие объемы достаточно концентрированных осадков, высокая экономичность.

Флотация при благоприятных условиях обеспечивает 85-95%-ю степень очистки стоков. Для ее повышения часто используют предварительную коагуляцию. Практикой очистки производственных сточных вод выработаны различные конструктивные схемы, приемы и методы флотации, среди которых нет преобладающих.

Нет и единой классификации способов флотации. Наиболее часто ее связывают со *способом образования пузырьков*. По этому признаку различают: флотацию с выделением воздуха из раствора (вакуумная, напорная) и с механическим диспергированием воздуха (импеллерная, безнапорная, пневматические установки).

Флотация с выделением воздуха из раствора применяется для очистки сточных вод, содержащих самые мелкие пузырьки воздуха (15-30 мкм). Сущность ее состоит в создании пересыщенного раствора воздуха в жидкости. Его количество, которое необходимо выделить для обеспечения эффективной флотации, составляет обычно 1-5% объема сточных вод.

Вакуумная флотация заключается в том, что сточные воды предварительно насыщают воздухом в течение 1-2 мин в аэрационной камере. Далее под действием разрежения (0,02-0,03 МПа) они попадают во флотокамеру, где растворившийся воздух выделяется в виде микропузырьков и выносит частицы загрязнений в пенный слой. Пена вращающимися скребками удаляется в пеносборник. Продолжительность пребывания сточных вод во флотокамере составляет около 20 мин, нагрузка на квадратный метр площади поверхности равна приблизительно $200 \text{ м}^3/\text{сут}$.

Преимуществом вакуумной флотации является то, что образование пузырьков газа, их слипание с частицами загрязнений и всплывание происходят в спокойной среде, а вероятность их разрушения сводится к минимуму. Минимальны также энергозатраты на насыщение жидкости воздухом, на образование и измельчение воздушных пузырьков.

К недостаткам метода относятся необходимость сооружения герметичных закрытых резервуаров, сложность эксплуатации вакуумных установок и ограниченный диапазон применения (для примесей с концентрацией не более 250 мг/л).

Напорная флотация получила широкое распространение и используется при концентрации загрязнений до 4-5 г/л и более.

При этом способе сточные воды насосом закачивают в напорный бак (сатуратор), в который под давлением 0,3-0,5 МПа подают воздух. Продолжительность пребывания сточных вод в сатураторе составляет 1-3 мин. Вода из сатуратора поступает во флотокамеру, в которой выделяющиеся из раствора пузырьки воздуха всплывают вместе с частицами взвешенных веществ. Всплывающая масса непрерывно скребается в пеносборники.

Напорные флотоустановки с производительностью до $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ выполняют прямоугольными в плане и с глубиной 1,0-1,5 м. При производительности более $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ устанавливают двухкамерные радиальные флотаторы глубиной не менее 3,0 м (рис. 4.18). В первом отделе-

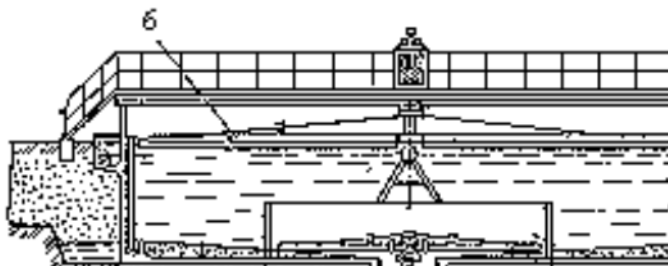


Рис. 4.18. Радиальный флотатор:

1, 2 — соответственно отстойная и флотационная камеры; 3 — вращающийся водораспределитель; 4 — подача сточной воды; 5 — опорожнение флотатора и отвод осадка; 6 — механизм для сгребания пены; 7 — выпуск обработанной сточной воды

нии происходит образование пузырьков воздуха и агрегатов пузырьке-частица, а во втором — всплывание пены и осветление жидкости. Глубина зон флотации и отстаивания назначается не менее 1,5 м, продолжительность пребывания в них воды рассчитывается соответственно на более чем 5 и 15 мин. Подача сточных вод в напорный флотатор осуществляется снизу. Производительность его достигает $2000 \text{ м}^3/\text{ч}$.

Кроме радиальных, используют также горизонтальные и вертикальные конструкции флотаторов.

Флотация с механическим диспергированием воздуха наиболее распространена применительно к импеллерным установкам (рис. 4.19). Диспергирование в данном случае основано на следующем. При быстром вращении турбинки за ее лопастями создается пониженное давление. Как следствие, воздух засасывается из атмосферы по трубе и диспергирует в жидкости на мелкие пузырьки. Решетки, расположенные вокруг импеллера (на рис. 4.19 не показаны) способствуют более мелкому диспергированию воздуха в воде. Скорость вращения импеллера принимается равной 12-15 м/с, его диаметр не превышает 750 мм. Другие параметры: сечение флотокамеры (в плане) квадратное со стороной не более 6 м, высота камеры 1,5-3,0 м, продолжительность флотации 20-30 мин при расходе воздуха $30\text{-}50 \text{ м}^3/\text{ч}\cdot\text{м}^2$ площади флотомашины. Площадь, обслуживаемая одним импеллером, обычно равна $30\text{-}50 \text{ м}^2$.

Применение импеллерных установок целесообразно при очистке сточных вод с высокой концентрацией грубодисперсных нерастворимых соединений (более 2-3 г/л), а также содержащих нефть, нефтепродукты, жиры.

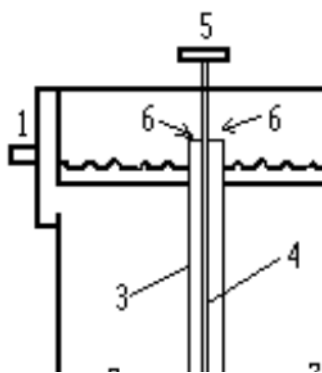


Рис. 4.19. Схема флотационной установки с импеллером:

- 1 — подача сточной воды;
- 2 — импеллер;
- 3 — воздушная труба;
- 4 — вал;
- 5 — привод;
- 6 — засасываемый воздух;
- 7 — направление движения пузырьков воздуха;
- 8 — отвод очищенной воды

Недостатком импеллерных конструкций является выдача относительно высокообводненной пены, что заставляет создавать дополнительные установки по ее обработке в случае, когда основная цель флотации заключается в извлечении растворимых ПАВ.

Схемы флотации в *безнапорных установках* с механическим диспергированием воздуха аналогичны напорной, но в ней отсутствует сатуратор. Диспергирование воздуха происходит за счет вихревых потоков, создаваемых рабочим колесом центробежного насоса. Образующиеся пузырьки имеют большую крупность, поэтому эффект флотации мелких частиц понижен. Установки применяют для очистки сточных вод от жира и шерсти.

Пневматические флотационные установки используют при очистке сточных вод, содержащих растворенные примеси, агрессивные по отношению к материалам движущихся частей (насосам, импеллерам). В этом случае воздух подается непосредственно во флотационную камеру через сопла

воздухораспределительных трубок, уложенных на расстоянии 0,25-0,30 м друг от друга. Диаметр отверстий сопел 1,0-1,2 мм; рабочее давление перед ними 0,3-0,5 МПа, скорость выхода струи 100-200 м/с. Глубина флотатора составляет 3-4 м, продолжительность флотации 15-20 мин, интенсивность аэрации 15-20 м³/м²·ч.

Частным случаем пневматической флотации является *флотация с подачей воздуха через пористые материалы*. Ее иногда выделяют в самостоятельную группу. В таком варианте воздух во флотационную камеру подают через мелкопористые пластины, трубы, насадки, уложенные на дно камеры и имеющие отверстия 4-20 мкм. Давление воздуха перед ними составляет 0,1-0,2 МПа, продолжительность флотации 20-30 мин, уровень обрабатываемой воды равен 1,5-2,0 м.

Недостатки метода состоят в возможном зарастании и засорении пор, а также в трудностях подбора пористых материалов, обеспечивающих получение мелких близких по размерам пузырьков воздуха.

4.3.4.7. Ультрафиолетовое облучение и другие методы энергетического воздействия

Ультрафиолетовое облучение обусловлено невидимой частью оптического диапазона электромагнитных колебаний, расположенной за крайними фиолетовыми лучами. Длина УФ-волн составляет 0,4-0,005 мкм. Их в заметном количестве испускают тела с температурой в несколько тысяч градусов, поэтому в излучении ламп накаливания они практически отсутствуют. Однако значительное УФ-излучение инициирует электрическая дуга, особенно в присутствии паров ртути (ртутные лампы).

В диапазоне волн 200-300 нм оно губительно действует на микроорганизмы. Гибель бактерий происходит в основном за счет необратимого повреждения молекул ДНК. Степень дезактивации (отношение конечной концентрации N микроорганизмов к их начальной концентрации N_0 до облучения) определяется выражением:

$$N = N_0 \exp (-Et/k), \quad (4.36)$$

где Et — доза облучения;

t — время облучения;

E — интенсивность облучения;

k — сопротивление микроорганизма.

В регламентирующих документах ряда стран принято, что для эффективного обеззараживания воды необходимы дозы ультрафиолетового облучения не менее 16 мДж/см². Чаще всего они составляют 16-40 мДж/см², в зависимости от качества обрабатываемой воды, ее назначения, применяемого оборудования и других факторов.

В соответствии с методическими указаниями Минздрава России «Санитарный надзор за применением ультрафиолетового излучения и технологией подготовки питьевой воды» (№ 2.1.4.719-98), этот вид обработки можно использовать на этапах заключительного и предварительного обеззараживания воды. В последнем случае величина дозы ультрафиолетового излучения не регламентируется. При заключительном обеззараживании она должна быть не менее 16 мДж/см² для всего объема воды, прошедшей через установку. Однако обеспечение бактерицидного эффекта не гарантирует уничтожение вирусов, которое необходимо обеспечивать на предшествующих этапах водоподготовки (коагуляция, фильтрация).

При очистке стоков, в соответствии с МУ 2.1.5.732-99 «Санитарно-эпидемиологический надзор за обеззараживанием сточных вод», ультрафиолетовое излучение рекомендуется применять для потоков, прошедших полную биологическую очистку и доочистку и характери-

зующихся следующим качеством: взвешенные вещества и БПК₅ не более 10 мг/л каждого, ХПК не более 50 мг/л, число термотолерантных колиморфных бактерий 5-10/л, коли-фаги в пределах 5-10 БОЕ/л. Для всего объема воды, прошедшего через аппарат, устанавливается доза излучения не менее 30 мДж/см².

Разработаны три принципиальные схемы размещения УФ-аппаратов: 1) открытые УФ-лампы, расположенные над текущим либо рядом с падающим потоком воды; 2) лампы, окружающие поток, проходящий через кварцевую либо другую прозрачную для УФ-излучения трубу; 3) лампы в прозрачном чехле, погруженные в поток. Распространенным источником УФ-излучения бактерицидного диапазона являются лампы на парах ртути и инертных газов.

В настоящее время используют два основных типа ультрафиолетовых ртутных излучателей (бактерицидных ламп): ртутные газоразрядные лампы низкого (НД) и высокого (ВД) давления. За рубежом последние называют лампами среднего давления.

Лампы НД (3-4 мм рт. ст.) преобразуют до 40-50% электрической энергии в энергию бактерицидного излучения, имеют незначительную мощность единичного источника (до 0,2 кВт) и рабочую температуру поверхности 40°C. При их излучении в среде не образуются токсичные побочные продукты, но может изменяться химический состав воды в результате фитохимических превращений растворенных в ней веществ.

Лампы высокого (среднего) давления (400-800 мм рт. ст.) характеризуются сплошным спектром излучения начиная с 220 нм, имеют единичную мощность до 10 кВт при КПД 6-8%. Остальная энергия выделяется в виде тепла и видимого света, в связи с чем эти лампы работают при температуре поверхности более 600°C. Высокая единичная мощность ламп ВД позволяет упростить конструкцию и уменьшить габариты установки, но достигается это пятикратным снижением ее КПД.

Сроки эксплуатации ламп НД и ВД достигают соответственно 12000 и 5000 ч. Спад интенсивности в их конце составляет обычно 20-40%.

В последние годы наряду с ртутными лампами ВД начинают применять излучатели с так называемым тихим разрядом, используя в качестве рабочего газа ксенон или смесь криптона и хлора, подвергаемые воздействию электрического поля. В первом случае генерируется излучение с максимумом на длине волны 172 нм, во втором — 222 нм (Oppenlander).

Эффективность ультрафиолетовой обработки возрастает при сочетании ее с другими методами, например кавитацией (процесс Cавox).

Кавитация создается дросселированием в трубе потока сточных вод с давления 5 атм до 15 мм рт. ст. Образующиеся в потоке пузыри газа разрушаются, обуславливая локальные температуры до 5000 К и давление до 1000 атм.

Ультрафиолетовое облучение с использованием ряда окислителей позволяет удалять из воды примеси до очень низких концентраций. Эти добавки (пероксид водорода, озон, хлор, некоторые металлы, например медь и серебро) оказывают синергическое действие на результаты обработки. Степень усиления (N_o/N) в ряде случаев достигает величины 10^3 и более — для микроорганизмов и 10^2 — для органических примесей. Так, введение добавок H_2O_2 обеспечивает обезвреживание и разложение 95-99,98% патогенных организмов, вирусов, грибов и некоторых органических примесей. В частности, содержание бензола снижается с 500 до 25 мг/л. При производительности установки 10 тыс. м³/сут стоимость обработки по сравнению с очисткой воды углем снижается в 5-6 раз (Cavitation...).

Первые установки УФ-очистки освоены в Германии и Франции еще в 1910 г., но интенсивное внедрение этих технологий начато в 80-е годы текущего столетия, прежде всего в Западной Европе и США. За последние 15-20 лет в них пущены около 150 станций ультрафиолетовой обработки воды с расходом до 10 тыс. м³/ч. Более 1500 муниципалитетов США используют эту технологию в городской системе очистки сточных вод. Крупнейшая в мире станция производительностью свыше 1 млн м³/сут расположена в Калгари (Канада). В некоторых случаях сточные воды канализационных очистных сооружений после обеззараживания ультрафиолетом сбрасывают в прибрежные воды при сохранении полного соответствия последних европейским стандартам для купания (Ultraviolet...). В последние 10 лет УФ-обработка СВ получает распространение и в нашей стране (Костюченко).

В целом полагают, что для обеззараживания воды более перспективны ртутные лампы НД, а для разрушения органических соединений сточных вод — ртутные лампы ВД или другие источники жесткого ультрафиолетового излучения.

УФ-облучение в ряде случаев оказывается альтернативой традиционным методам очистки сточных вод окислением (хлорированию и озонированию). Это обуславливается не только эффективностью очистки, но и конкурентоспособностью по другим показателям.

Можно выделить следующие основные преимущества УФ-технологии дезинфекции воды: 1) снижение в 3-4 раза энергозатрат, в 2 раза — капитальных вложений и в 5 раз — эксплуатационных затрат по отношению к совокупным энергозатратам озонаторных систем. В сравнении с хлорированием инвестиционные затраты составляют около 50%,

эксплуатационные затраты в среднем равны 0,0102 Евро/м³ (Grägel); 2) экспоненциальную зависимость степени дезинфекции от дозы излучения, в связи с чем небольшое (на единицы-десятки процентов) возрастание мощности ультрафиолетового потока в несколько раз увеличивает эффективность обезвреживания; 3) большую электробезопасность установок, работающих при напряжении 110-380 В против 8-30 кВ у озонаторов; 4) исключение возможности образования побочных загрязнителей — диоксинов при хлорировании или броматов при озонировании; 5) неизменные окислительные характеристики воды.

Вместе с тем УФ-технологии имеют некоторые принципиально слабые стороны. Так, для дезинфекции питьевых и обеззараживания очищенных сточных вод они эффективны лишь при содержании в них не более 30 мг/л взвешенных частиц и не более 2-3 мг/л железа, при цветности не выше 50-60°. Ультрафиолетовая обработка обладает слабо выраженным последствием, поэтому на крупных промышленных станциях, где она используется для дезинфекции, обычно применяют дохлорирование или предусматривают его в резерве.

Помимо ультрафиолетового облучения, известны технологии радиационного, плазменного и ультразвукового энергетического воздействия на загрязнения водной среды.

Радиационное воздействие может быть реализовано в режиме обработки пучком ускоренных электронов (разд. 3.4.2.3) или ионизирующей радиации (разд. 6.2.2).

Как известно, при облучении *пучком ускоренных электронов* с распадом некоторых молекул воды образуются свободные радикалы и ионы, часть из которых обладает сильно окислительными, а другая часть — сильно восстановительными свойствами. Эти активные частицы взаимодействуют с токсичными примесями, превращая их в безвредные продукты. Метод является эффективным и универсальным при обезвреживании многих загрязняющих компонентов, поскольку излучение оказывает комплексное действие на обрабатываемую воду: разлагаются органические и неорганические соединения, ускоряются седиментация и коагуляция, устраняются цветность и запах, снижаются величины ХПК и БПК, происходит дезинфекция воды. Излучение оказывает и бактерицидное действие, предотвращающее биообрастание в технологических системах, что особенно важно при создании замкнутых систем водопользования. Эффекты очистки (99% по органическим соединениям) достигаются без дополнительного введения в воду химических или бактериальных реагентов, которые сами по себе являются загрязнителями. Наличие нерастворимых примесей в пределах 8% не влияет на эффективность процесса.

Первые установки радиационно-химической очистки были внедрены на Воронежском заводе синтетического каучука для обезвреживания растворов бионеразлагаемых ПАВ и в США — на станции водоочистки. По последним данным, обработка сточных вод электронным пучком делает их по качеству соответствующими стандартам хозяйственно-питьевого водоснабжения. В настоящее время разработаны и находятся в эксплуатации промышленные установки производительностью 5000-10000 м³/сут при стоимости обработки 1 м³ вод (в режиме дезинфекции), равной 0,2-0,4 дол. США (Ванюшкин).

Ионизирующая радиация, по зарубежным данным, также используется для дезинфекции сточных вод. В качестве ее источника, как правило, применяют Со-60 с удельной активностью 25 Ки/г. Обработанная вода протекает через защищающий от радиоактивного излучения футляр, в котором заключен источник радиации.

По опубликованным данным, интенсивность радиации должна быть следующей: для дезинфекции 4,5·10³ Дж/кг при 10⁵ Ки/м³·ч; для полной стерилизации 45·10³ Дж/кг при 10⁶ Ки/м³·ч. Полагают, что эффективность этой установки в среднем составляет 70-90%.

Действенность радиационной очистки сточных вод может быть повышена различными приемами: введением в стоки окислителей (Н₂О₂, О₃ и др.), продуктов радиоллиза и фотоллиза воды и воздуха, переводом легколетучих соединений-загрязнителей в газовую фазу, комбинированным применением ионизирующего и ультрафиолетового излучения (фоторадиационное разложение) и т.д. (Подзорова).

Использование плазмы предполагается тогда, когда другие способы практически не применимы. Ее источник — электрическая дуга с температурой до 4000°С. Загрязненная жидкость впрыскивается в высокотемпературную область, при этом происходит деструкция практически всех поллютантов. Далее пары воды отводятся и конденсируются. При длине факела плазмы 10-50 см потребляемая электрическая мощность составляет 200-700 кВт (Procedé...).

Ультразвуковое излучение (УЗИ) используется для удаления из сточных вод растворенных и суспензированных частиц. Соответствующее устройство имеет вытянутый цилиндрический корпус, в котором коаксиально с зазором установлен другой цилиндр (I). Исходная СВ подается в нижнюю часть I и через боковой патрубок отводится из его верхней части. На дне I размещен дисковый источник УЗИ (частота 19,5-40 кГц, интенсивность 1,5-1,75 Вт/см²). При его работе в жидкости формируется звуковое поле такой формы, при которой твердая фаза СВ отжимается к стенке I. В последней выполнены перфорации, через которые она уходит и отводится по кольцевому зазору между емкостями (Scott).

4.3.5. Биохимические

4.3.5.1. Общие сведения

Рассмотренные выше физико-химические методы относятся к числу наиболее эффективных, однако зачастую имеют высокую стоимость и вносят вторичные загрязнения. В ряде случаев по этим показателям преимуществом обладают биохимические методы. Они отличаются более высокой степенью и селективностью очистки, самовозобновляемостью процесса, сравнительно несложным аппаратным оформлением, большей экологической безопасностью для теплокровных при сбросах в водоемы. Сущность этих методов дана в разд. 4.3.1.

Биохимические способы в настоящее время нашли широкое применение для очистки как хозяйственно-бытовых, так и промышленных сточных вод от многих растворенных органических и неорганических веществ (сероводорода, сульфидов, аммиака, нитритов цветных металлов). Производственные сточные воды после биохимической очистки можно использовать для технического водоснабжения или сбросить в водоем при БПК_{полн} 15-20 мг/л и таком же количестве взвешенных веществ. На современных очистных сооружениях биохимической очистки эти показатели являются обычно предельно достижимыми.

Биохимическая очистка основана на способности микроорганизмов использовать для питания находящиеся в сточных водах вещества (кислоты, спирты, белки, углеводы и т.д.), являющиеся для них источником энергии. В процессе питания микроорганизмов происходит прирост их массы. В сообщество микроорганизмов (биоценоз) входит множество различных бактерий, простейших и ряд более высокоорганизованных микроорганизмов (микроводорослей, грибов, дрожжей и др.). Основная роль в сообществе принадлежит бактериям, число которых составляет 10^6 - 10^{14} клеток на 1 г сухой биологической массы. Число родов бактерий может достигать 5-10, а видов — несколько десятков и даже сотен. Масса микроорганизмов создает так называемый активный ил с концентрацией до 2-5 г/л сточных вод (в искусственных сооружениях типа аэротенков).

Активный ил представляет собой амфотерную коллоидную систему с pH 4-9 и отрицательным зарядом. Сухое вещество активного ила состоит из органических (70-90%) и неорганических (10-30%) веществ. Кроме микроорганизмов, в состав активного ила входит субстрат — твердая отмершая часть водорослей и различные твердые остатки. Его содержание в иле достигает 40%. К нему прикрепляются

микроорганизмы различных групп. По внешнему виду активный ил представляет собой буровато-желтые комочки и хлопья размером 3-150 мкм, с поверхностью около 1200 м^2 на 1 м^3 ила.

Захват примесей микроорганизмами осуществляется различными метаболическими путями. Основные из них — связывание примесей поверхностью клеток (адсорбция, в данном случае биосорбция), внутриклеточное накопление, внеклеточное осаждение (биокоагуляция) и комплексообразование.

Для увеличения емкости биосорбентов на них воздействуют щелочными или органическими растворами, ультразвуком и т.п., причем сорбционная активность мертвых клеток микроорганизмов, как правило, выше, чем живых.

Известны два вида процессов с участием микроорганизмов: окислительные (аэробные) в присутствии кислорода, наиболее распространенные в очистке сточных вод; восстановительные (анаэробные) в отсутствие кислорода.

Оптимальными для процессов являются: температура $20-30^\circ\text{C}$, pH среды 5-9 (предпочтительнее 6,5-7,5); наличие, кроме основных (углерода, азота, кислорода, водорода), других биогенных элементов клетки (марганца, меди, цинка, железа, кальция, натрия, калия и пр.); питание на уровне 300 мг БПК_{полн} на 1 г беззольного вещества микроорганизмов в сутки; концентрация растворенного кислорода не ниже 2 мг/л; концентрация веществ ниже ПДК_{6.0.с} (биохимических очистных сооружений). При превышении последних отмечается заметное отрицательное действие субстанций на работу биохимических очистных сооружений.

Биохимическая очистка сточных вод осуществляется в естественных и искусственных условиях. В первом случае используют почвы, проточные и замкнутые водоемы (реки, озера, лагуны, пруды), во втором — специально построенные очистные сооружения (биофильтры, аэротенки, метатенки, биосорберы, биоконтактторы).

4.3.5.2. Природные условия

Очистку сточных вод в природных условиях обычно ведут на полях фильтрации или орошения и в биологических прудах. Первых два метода до недавнего времени применяли для очистки бытовых стоков, и лишь в последнее время появились разработки по их приложению к производственным водам.

Суть очистки на полях *фильтрации* состоит в том, что при просачивании жидкостей через почву специально выделенных участков в ней адсорбируются взвешенные и коллоидные вещества, способствующие

щие развитию в почвенных порах микробиологической пленки. Последняя окисляет задержанные органические соединения, превращая их в минеральные композиции.

Поля фильтрации предпочтительнее располагать на земельных участках со слабовыраженным рельефом, имеющих уклон около 0,01 при суглинистых грунтах и до 0,05 — на песчаных. Для улучшения условий эксплуатации и увеличения допустимой нагрузки на них рекомендуется кратковременное (0,25-0,30 ч) отстаивание сточной жидкости. Допустимая нагрузка по объему стоков на поля фильтрации зависит от многих факторов (климатических условий района, структуры и состава почв, уровня грунтовых вод, характера загрязнения сточных вод и т.п.), поэтому она колеблется в весьма широких пределах (50-200 м³/га·сут). Мощность полей фильтрации достигает 280 тыс. м³/сут. Нагрузка по количеству загрязняющих веществ, оцениваемая по БПК_{полн}, принимается равной 20-80 кг/га. Сбор и отвод профильтрованных сточных вод производят с помощью открытых (канавы) и закрытых (трубы) дренажных устройств.

При оптимальных температуре, рН, водопроницаемости почв и других факторах эффективность очистки может составить более 80% по минерализации органических веществ, свыше 90% по взвешенным соединениям, более 40% по азотным при недостаточной дефосфатации и средней степени обеззараживания.

Использование сточных вод для целей орошения известно с древних времен. Особенно широкое применение оно получило с середины 19 в. В России первые поля орошения были устроены в конце 19 в. (Одесса, Киев, Москва).

Поля орошения отличаются от полей фильтрации тем, что они являются сельскохозяйственными угодьями. В этом случае, помимо очистки стоков, преследуется цель утилизации в интересах сельского хозяйства веществ (органики и микроэлементов), в них содержащихся. Пропускная способность полей орошения обычно составляет 15-25 м³/га·сут. Наряду с очисткой сточных вод орошение ими зачастую обеспечивает повышение урожая зеленой массы, например на пастбищах и в овощеводстве.

Серьезной проблемой использования полей орошения может явиться загрязнение почвы и заражение растений патогенными бактериями и яйцами гельминтов, что требует поиска и разработки новых очистных систем, безопасных в санитарном отношении. Однако в европейских странах на сельскохозяйственные поля в качестве удобрений направляют в среднем до 33% осадков городских сточных вод (в Израиле — 66%), и этот путь при соответствующем уровне культуры производст-

ва считается наиболее перспективным. В России это направление в общем не развивается.

Поля орошения и фильтрации следует размещать от водозаборных сооружений вниз по течению грунтовых безнапорных вод на расстоянии 200-500 м, в зависимости от типа грунтов. По отношению к населенным пунктам их рекомендуется располагать с подветренной стороны с защитной зоной не менее 200-300 м. Ширину полосы насаждений, в зависимости от удаленности полей от населенных пунктов, принимают равной 10-20 м.

Биологические пруды — искусственные водоемы в естественных или искусственных углублениях, в которых для очистки стоков используют естественные процессы. Пруды могут применяться как для очистки, так и для доочистки вод, прошедших биохимическую обработку. Второй вариант имеет преимущественное распространение. Если требуется еще более глубокая очистка, то стоки после прудов дополнительно пропускают через песчаные фильтры. По технико-экономическим соображениям пруды целесообразно применять для относительно небольших объемов жидкостей (до 5-6 тыс. м³/сут).

Качество очистки вод в биопрудах, в соответствии с нормами Европейского союза, должно составлять по БПК₅ 25 мг/л, по ХПК 125 мг/л (другие параметры не нормируются). Главное достоинство данных систем — малолюдность технологии, осадок можно удалять 1 раз в год или реже.

К недостаткам этих сооружений следует отнести низкую окислительную способность, сезонность работы, потребность в больших территориях, неуправляемость и затрудненность очистки.

Различают пруды с естественной и искусственной аэрацией, одно- и многоступенчатой. Наиболее эффективны 3-4-ступенчатые пруды, в которых первая ступень составляет отстойную часть, рассчитанную на 6-24 ч пребывания воды.

Глубина последней в активной части очистного пруда не должна быть более 1 м, чтобы не создавать ее обескислороживания в придонных слоях. Однако для доочистных прудов при БПК поступающей воды до 20 мг/л глубину пруда можно довести до 3 м.

Среди прудов выделяют относительно мелкие (стабилизационные), в которых наряду с естественной аэрацией (окислением) существенную роль в очистке загрязненных вод играет фотосинтез водорослей.

Значительное сокращение площади биологического пруда достигается искусственной аэрацией (поверхностные механические или пневматические аэраторы). В частности, для примесей спиртов, фенолов, альдегидов, жирных кислот продолжительность полного окисления сокращается с 40-60 до 12 сут. Глубину прудов с механической аэраци-

ей следует принимать не менее 3-4 м, чтобы избежать размывания дна мощными циркуляционными потоками.

В странах с относительно мягким климатом биологические пруды получили значительное распространение. Так, в США их насчитывается 5000, Франции — 2500, Германии — 1000. В Европе их применяют свыше 100 лет.

Биологические пруды требуют СЗЗ (200 м).

При наличии местных условий для интенсификации процессов жизнедеятельности микроорганизмов воду, выходящую из биопрудов, следует пропускать через заросли прибрежно-водной высшей растительности (камыш, тростник, ряска и т.д.). Грунтом на участках в этом случае служат чернозем, глина, гравий, солома, их комбинации и т.п. Общая глубина слоя достигает 0,6-0,7 м, причем нижняя его часть обычно представлена гравием диаметром 3-10 мм на высоту 0,5 м, а верхняя — глиной или растительным грунтом толщиной 100-150 мм. Участки имеют уклон $\sim 1^\circ$ при скорости потока 0,3-0,5 м/с.

Растительность в вегетационный период практически полностью извлекает из воды соединения азота, чем защищает ее от эвтрофикации. Нагрузка по воде в этом случае может составлять 20 тыс. $\text{м}^3/\text{сут.}$ на 1 га при размещении 100-200 стеблей на 1 м^2 .

Численность водной растительности регулируется растительоядными рыбами (белый и местный амур, толстолобик и др.) в количестве пяти экземпляров взрослых особей на 1 га зарослей растительности. Если условий для разведения рыб нет, необходимо периодически выкашивать излишнюю растительность.

Очистка сточных вод на растительных участках от органических соединений (хлорбензол, хлорфенол, бензол, этилбензол и пр.) достигает 94-100%, БПК — 85-95%, взвешенных веществ — 97,0-98,5%.

В мире в настоящее время функционирует более 1000 таких природных и построенных человеком участков, в том числе 600 в США, 250 в Европе и 30 в СНГ.

4.3.5.3. Искусственные условия

Сооружения биохимической очистки по признаку закрепления в них активной биомассы можно разделить на три группы: 1) биомасса фиксируется на неподвижном материале; 2) активная биомасса находится в воде в свободном (взвешенном) состоянии; 3) сочетаются оба варианта.

Удержание (иммобилизация) микробной массы в потоке и ее концентрирование обеспечивают высокие скорости процесса. Для получения стандартных одинаковых размеров частиц биосорбентов иммобилизацию биоматериала проводят на различных носителях. В их качестве

используют полимерные вещества (полиэтилен, полипропилен), частицы угля, магнитные и ферромагнитные частицы, другие материалы. Инертные носители быстро обрастают микрофлорой с образованием прикрепленной биопленки. Иммобилизация уменьшает вымывание культур микроорганизмов из реакционной зоны, облегчает отделение биомассы из растворов, увеличивает срок службы биосорбентов.

К устройствам с иммобилизированной загрузкой относятся биофильтры. Как и в физических способах, фильтрование в данном случае реализуют либо в глубине фильтрующего материала, либо на его поверхности. Впервые оно было применено в конце 19 в.

Биофильтры по способу поступления воздуха в глубину загрузки делят на сооружения с *естественной* и *принудительной подачей воздуха*.

Естественную подачу применяют для очистки небольших количеств сточных вод (до $1000 \text{ м}^3/\text{сут}$).

В биофильтрах с принудительной подачей воздуха (рис. 4.20) сточная вода по трубопроводу 3 поступает в фильтр 2, через водораспределительное устройство 4 равномерно разбрызгивается по площади фильтра, а далее проходит через загрузку 5. Для интенсификации окисления органических примесей через трубопровод 1 и опорную решетку 6 подается сжатый воздух в противоток с направлением фильтрования. Очищенная вода выводится из фильтра через трубопровод 7. Производительность таких биофильтров достигает 50 тыс. $\text{м}^3/\text{сут}$.

Высота слоя загрузки биофильтра с естественной подачей воздуха обычно не превышает 2 м, при принудительной подаче она достигает 4 м. Фильтрующим материалом служат шлак, щебень, керамзит, гравий, пластмасса (в виде колец Рашига, пластин, решеток и т.п.). Период адаптации микроорганизмов биофильтра к различным видам органических загрязнений сточных вод составляет 2-4 недели, для некоторых производственных сбросов он длится несколько месяцев.

В нормально работающем биофильтре общая толщина слоя биопленки изменяется от микрон в верхних его слоях до 3-6 мм в нижних. Отработавшая и омертвевшая пленка смывается и выносится из биофильтра очищаемыми стоками.

При повышенных требованиях к качеству очищенных стоков применяют двухступенчатую схему работы биофильтра, причем первая ступень рассчитывается на неполную очистку (до БПК порядка 50 мг/л). Примером такого рода служит *затопленный* цилиндрический вертикальный биофильтр, в корпусе которого с разрывом расположены 2 слоя загрузки с высотой каждого из них до 1,5 м. Верхний слой представлен рифлеными пластинами ПВХ. Нижний слой, в ко-

тором проводится доочистка, заполнен гранулятом из вспененных полимеров с крупностью частиц 3-6 мм (Williams T.).

Вода, поступающая на биофильтры, не должна содержать плавающих масел, жира, кислот, щелочей, смол и других примесей, мешающих биохимической очистке. При превышении их нормы сточные жидкости необходимо предварительно обрабатывать.

Глубинные биофильтры изготавливают обычно круглыми, диаметром 6-30 м и более. Работают они, как правило, в восходящем потоке при его скорости до 6 м/ч. Однако известны биофильтры прямоугольного сечения. В ряде случаев используется плавающая фильтрующая загрузка в виде шариков полистирола диаметром 3-4 мм или полиэтиленовых лент (ширина 3 см, длина 6 м).

В ряде стран (США, Великобритания, Япония, Франция) созданы затопленные биофильтры, в которых в качестве загрузки и носителя биопленки используется песок. Они обеспечивают очистку городских СВ по БПК₅ на 85-95%, взвешенным веществам на 95-96% при нагрузке по БПК₅ 5-6 кг/м³·сут, гидравлической — 72-96 м³/м²·сут. Последние превышают показатели высоконагружаемых биофильтров соответственно в 3,0-3,5 и 6-7 раз (Танатарова).

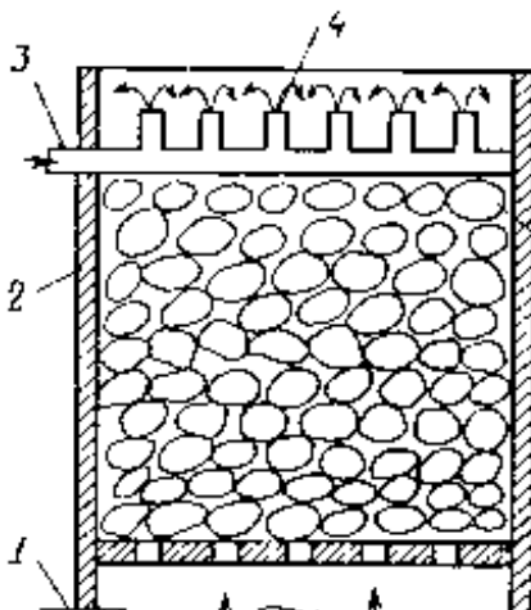


Рис. 4.20. Схема биологического фильтра

Высоконагружаемые биофильтры аналогичны представленному на рис. 4.20. Их конструктивным отличием являются большие высота слоя загрузки и крупность ее фракций, особая конструкция дна и дренажа. Она обеспечивает возможность искусственной продувки материала загрузки воздухом.

Для поверхностной биофильтрации начинают использовать керамические мембранные

микрофильтры с порами диаметром 0,2 мкм. Они особенно эффективны при удалении фекальных бактерий, степень очистки от которых достигает 99,9% (Boucard). Это объясняется тем, что размер отдельных частиц активного ила, представленного бактериями, составляет 2,5-13 мкм, а его хлопьев, полученных при использовании полимерных добавок, — 125 мкм (Caracterisation....).

Сточные воды, прошедшие через биофильтры, могут доочищаться на участках с высшей водной растительностью (*Select. proc...*).

Биофильтры успешно применяют для очистки сточных вод различных производств. Например, для нефтеперерабатывающих предприятий степень загрязнения стоков за 8-12 ч при производительности фильтра по БПК_{полн} 300 г/м³·сут снижается с 400-600 до 20-25 мг/л. В период после 1980 г. интенсивность работы биофильтров удалось существенно повысить (до 3000-8000 г БПК/м³·сут) за счет использования загрузки с весьма развитой поверхностью (Hodkinson...). В некоторых случаях интенсивность деструкции трудноокисляемых органических веществ в биофильтрах даже выше, чем в аэротенках.

К устройствам с биомассой в свободном (взвешенном) состоянии относят аэротенки и метатенки.

Аэротенки, впервые построенные в начале 20 в., являются сооружениями, наиболее часто применяемыми для биохимической очистки значительных количеств сточных вод. Они дают возможность эффективно влиять на скорость и полноту протекающих в них биохимических процессов. Окислительная мощность аэротенка составляет 0,5-1,5 кг БПК_{полн} в сутки на 1 м³ полезного объема сооружения. Начальная концентрация органических загрязнителей в стоках, поступающих в аэротенки, не должна превышать 1000 мг/л, продолжительность их пребывания равна 4-8 ч.

Классификация аэротенков:

по гидродинамическому режиму работы — аэротенки идеального вытеснения (аэротенки-вытеснители), идеального (полного) смешения (аэротенки-смесители) и промежуточные;

по нагрузке на активный ил — высоконагруженные (более 300 мг БПК_{полн} на 1 г беззольного вещества микроорганизмов в сутки), обычные (100-300 мг), низконагруженные (менее 100 мг);

по способу регенерации активного ила — аэротенки с отдельно стоящими регенераторами или совмещенные с регенераторами;

по числу ступеней очистки — одно-, двух- и многоступенчатые;

по конструкции — прямоугольные, круглые, комбинированные, противоточные, шахтные, фильтротенки, флототенки и другие, в целом аналогичные отстойникам;

по системе аэрации — пневматической, механической, комбинированной гидродинамической или пневмомеханической.

В *аэротенке-вытеснителе* сточные воды и ил впускают сосредоточенно в его торцовую часть, а прошедшую очистку воду и ил (иловая смесь) выпускают из другой торцовой части. Воздух подают, как правило, от компрессорной станции через воздухораспределительные устройства.

В начальной стадии процесса в аэротенке-вытеснителе наблюдается максимальное количество субстрата (загрязнителя) и дефицит кислорода, а в конечной стадии — избыток кислорода и минимальное количество субстрата. Таким образом, нагрузка на ил неравномерна по длине: вначале максимальна, а в конце минимальна. Эти сооружения используют, если БПК сточных вод не превышает 500 мг/л. Часто их применяют в многоступенчатых (ячеистых) конструкциях.

Аэротенки-смесители используют для очистки более концентрированных сбросов, особенно с резко колеблющимся составом. В этих сооружениях сточные воды и ил подводят и отводят равномерно вдоль длинной стороны сооружения (рис. 4.21). Нагрузка на ил, скорость изъятия загрязнений и потребления кислорода в данном случае постоянны по всей длине смесителя, что обеспечивает близкие к оптимальным условия существования микроорганизмов. Однако качество воды может оказаться несколько ниже, поскольку существует вероятность попадания части только что поступившего стока в отводную систему.

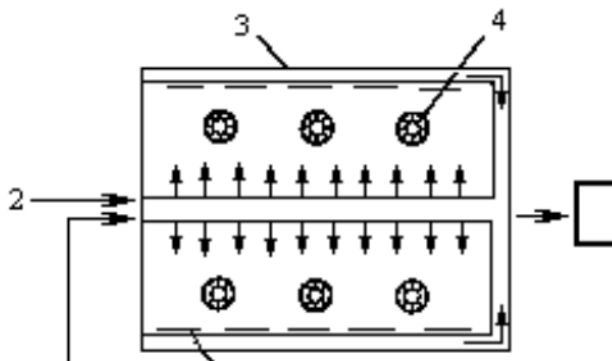


Рис. 4.21. Схема процесса активного ила с полным смешением:

1 — отходы ила; 2 — подача сточной воды; 3 — канал выхода чистой жидкости; 4 — механические аэраторы; 5 — выход воды; 6 — осадочная емкость; 7 — регулируемые барьеры; 8 — рециркуляция активного ила

В *аэротенки промежуточного типа* сосредоточенно подают либо воду (чаще всего), либо ил с отводом смеси сосредоточенно в конце сооружения. В варианте рассредоточенной подачи воды полная загрузка по загрязнению достигает максимума к концу сооружения, но степень очистки может быть очень высокой, так как по мере продвижения смеси по аэротенку ранее поданные загрязнения успевают перерабатываться, и к концу аэротенка уровень питания может соответствовать состоянию ила с высокой окислительной способностью. Однако аэротенки промежуточного типа имеют основной недостаток аэротенков-вытеснителей: отсутствие оптимальных условий по кислородному режиму в сооружении.

Интенсивность нагрузки по активному илу влияет на эффективность работы аэротенков. В частности, окислительная мощность *высоконагруженного аэротенка* выше, чем в обычных аэротенках, в 1,5-2 раза.

Ординарная концентрация ила в аэротенках составляет 2-3 г/л. При более высоких ее значениях возникают затруднения с разделением иловой смеси в обычных отстойниках. Вместо них приходится применять отстойники со взвешенным слоем, фильтры, центрифуги, флотацию и т.п.

Низконагруженные аэротенки применяют в основном для малых (до 1000 м³/сут) расходов сточных вод.

В аэротенках всех типов используют *аэрацию*: пневматическую, механическую, смешанную (комбинированную).

Пневматическая аэрация, в зависимости от крупности пузырьков, включает мелкопузырчатый (1-4 мм), среднепузырчатый (5-10) и крупнопузырчатый (более 10 мм) режимы ее реализации. К мелкопузырчатым относятся керамические, тканевые и пластиковые аэраторы фильтросного типа; к среднепузырчатым — перфорированные трубы, щелевые конструкции и др.; к крупнопузырчатым — открытые снизу вертикальные трубы, а также сопла.

В последнее время распространение получила *механическая аэрация*, особенно с 60-70 гг. 20 в. Несмотря на конструктивное разнообразие, принцип работы механических аэраторов одинаков: вовлечение воздуха вращающимися частями (ротором) и смешение его со всем содержанием аэротенка.

Классификация механических аэраторов:

по принципу действия — импеллерные (кавитационные) и поверхностные;

по плоскости расположения оси вращения ротора — горизонтальные и вертикальные.

Наибольшее распространение получили аэраторы поверхностного типа. Их особенность — незначительное погружение в сточную воду, непосредственная связь ротора с атмосферным воздухом.

Устройства механического типа имеют ряд преимуществ перед пневматическими аэраторами. Они обеспечивают в 2-3 раза большее насыщение сточных вод воздухом, надежны в эксплуатации и не требуют значительных затрат на обслуживание.

Аэраторы с горизонтальной осью вращения используются преимущественно в циркуляционных каналах, при этом они обеспечивают движение иловой смеси. Длина их горизонтальной оси 0,7-0,9 м. Впервые роторы такого типа применены в 1926 г.

Аэраторы с вертикальной осью вращения имеют диаметр рабочего колеса от 0,5 до 4,5 м. В зависимости от мощности привода, их производительность почти линейно возрастает, достигая 220 кг O_2 /ч при его энергопотреблении 80 кВт (Hunze).

В целом аэротенки представляют значительные по габаритам сооружения. Так, двух-, четырехкоридорные аэротенки-вытеснители имеют размеры $B \times H \times L = 4,4 \div 9 \times 3,2 \div 5 \times 36 \div 114$ м. Число конструкций аэротенков непрерывно возрастает.

Для отделения от очищенных сточных вод отмершей биопленки служат вторичные отстойники горизонтального, в частности радиального, и вертикального типов. Мощность последних ограничивают 20 тыс. m^3 /сут, при большей пропускной способности используют горизонтальные и радиальные отстойники.

Взвешенные вторичные вещества, поступающие в аэротенки, почти полностью расходуются на прирост массы активного ила. В аэротенках, работающих на неполную очистку, например в высоконагруженных, значительная часть загрязнений, захватываемых активным илом, не успевает окислиться. Поэтому активный ил из вторичных отстойников для восстановления его свойств направляют в регенераторы, в которых и происходит окончательное окисление органических веществ. Под регенераторы отводят до 50% объема аэротенков.

Нормальная работа биохимической очистки в значительной степени расстраивается при образовании пены. Проблема в последнее время обострилась одновременно с увеличением эффективности удаления биогенных элементов и снижением нагрузки на активный ил. Причины явления недостаточно ясны. Однако установлено, что росту пенообразования сопутствуют увеличение в активном иле количества нитчатых микроорганизмов и повышенное поступление в сточные воды ПАВ техногенного характера (Li...), наличие больших удельных объемов сооружений с анаэробными условиями (Schade...). Один из приемов борьбы со вспучиванием ила состоит в использовании аэротенков с на-

полнителями (инертными материалами). Это приводит к закреплению и развитию на поверхности микроорганизмов, в том числе нитчатых. Количество наполнителей не должно составлять более 30% общего объема аэрационной части (Яковлев...).

Известен также метод механического разрушения всплывшего ила. Его засасывают с поверхности отстойника притоленным погружным насосом, и ил в процессе перекачивания разрушается. Разделение образовавшейся смеси производят на барабанном фильтре (Gärtner).

В Земле Северный Рейн-Вестфалия с 2004 г. эксплуатируются крупнейшие очистные сооружения с разделением иловой смеси на мембранных фильтрах с проектной мощностью 45 тыс. м³/сут. Схема включает решетки, аэрируемые песколовки, жироловки, барабанные сепараторы с сетками 0,5 мм. Для защиты мембран от повреждений перед аэротенками устанавливаются специальные фильтры для удаления твердой фазы. Используются погружные мембранные модули половолоконного типа: размер пор 0,1 мкм, общая поверхность мембран 84,5 тыс. м². Объем аэротенков 9200 м³. Параметры процесса: предварительная денитрификация, ХПК исходных СВ более 800 мг/л, на выходе менее 25 мг/л (удаление 97%), пневмоаэраторы располагаются под мембранами, энергозатраты 0,4-0,8 кВт · ч/м³ (Brepols).

Очистка СВ в аэротенках сопровождается выбросами загрязнителей атмосферы, мг/л: NO_x — 52-128; CO₂ — 0,28-1,66; CO — 0-45; SO₂ — 0-89 (Комплексная...).

Метатенки предназначены для реализации анаэробных методов биохимической очистки (в отсутствие кислорода). Их применяют для удаления органических веществ из сильно концентрированных сточных вод или анаэробного сбраживания осадков.

В настоящее время насчитывается множество установок анаэробной очистки, прежде всего в агропромышленном и химическом комплексах, в муниципальном хозяйстве стран с тропическим (Индия, Бразилия, Колумбия) и субтропическим (Португалия и др.) климатом. Общее число систем анаэробной обработки только в Европе достигло 3500. На них ежегодно обрабатывается 1 млрд м³ стоков, обуславливающих образование до 60% шламов водоочистки.

Анаэробные технологии требуют более низких общих затрат, электроэнергии, ила, меньших площадей.

К их недостаткам относится медленный рост анаэробных, особенно метановых, бактерий. Для выхода на стабильный режим работы иногда требуется до нескольких месяцев, однако при использовании хорошей закваски срок можно сократить до нескольких дней. Бактерии довольно чувствительны к различным ингибиторам, например аммиаку, катионам металлов, цианидам, хлорсодержащим углеводородам, поэтому БПК

анаэробной очистки снижается только на 80-90%. В некоторых случаях, в частности при обработке отходов с высоким содержанием сульфатов, образуются продукты с неприятным запахом. Однако метановое сбраживание можно в нужный момент прекратить, передав обрабатываемый в метатенке материал в аэробный реактор. При воздействии кислорода на метабенные микроорганизмы их активность прекращается.

Для анаэробной очистки наиболее оптимальны температура 20-40°C и сточные воды следующего состава, мг/л: ХПК — 1000-10000; БПК — 50-5000; взвешенные вещества — до 5000; $(\text{NH}_4^+ - \text{N}) < 1700$; $\text{SO}_4^{2-} < 200$; $\text{Ca}^{2+} < 2000$; катионов < 4000 (Ван Старкенбург). Другие параметры анаэробных биохимических реакторов (Катраева): скорость восходящего потока жидкости 2-31 м/ч (обычно 10-25); продолжительность пребывания СВ 1-14 ч (2-8).

Конструктивно метатенк представляет собой цилиндрический (диаметром до 20 м и более) или прямоугольный железобетонный резервуар с коническим днищем и герметичным перекрытием (рис. 4.22). Впуск свежего осадка производят по трубе. Выделяющийся из метатенка газ содержит, об. %: CH_4 — 60-65; CO_2 — 16-34; N_2 и H_2 — по 0-3. Его теплотворная способность составляет обычно около 20 тыс. кДж/м³.

При необходимости ил в метатенке подогревают непосредственно впуском в иловую камеру горячей воды или элеватором с циркулирующей горячей водой, либо острым паром.

К числу устройств с комбинацией иммобилизованных и свободных микроорганизмов относятся биосорберы и биоконтакторы.

Биосорберы представляют собой реактор, сочетающий псевдооживленный и фильтрующий слои. Окисление основной массы растворенных органических загрязнений осуществляется в аэробных условиях псевдооживленного слоя активированного угля микроорганизмами, иммобилизованными на его поверхности. Удаление взвешенных и окончательное окисление органических веществ происходят при фильтрации жидкости в восходящих потоках через плотный слой угля. Биосорберы обеспечивают удаление примесей на 80-100%, снижение цветности на 75-100% и содержания аммонийного

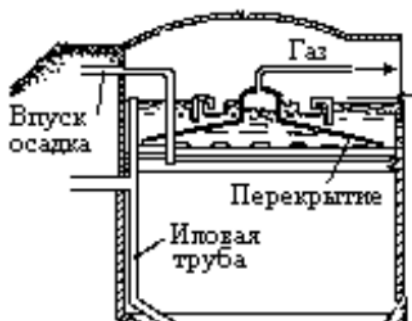


Рис. 4.22. Метатенк

азота на 82-96%. Регенерирование активированного угля необязательно, он может быть использован в качестве топлива.

Биоконтактор — это вращающийся сетчатый барабан, заполненный насыпной загрузкой из пластмассовых элементов различной конфигурации и размещенный в аэротенках в полупогруженном состоянии.

Опытно-промышленный образец биоконтактора использован, в частности, для очистки сточных вод сахарного завода в России. Биоконтактор диаметром D 1,5 м, длиной 2 м и с частотой вращения 2 мин^{-1} был погружен в аэротенк на 0,4 D . Окислительная мощность установки за 12-часовой период оказалась почти в два раза большей, чем в двухступенчатом аэротенке. Степень очистки по БПК_{полн} при его исходной концентрации 300-2625 мг/л составила 90-95% (Демидов...).

Контактор несколько иной конструкции в сочетании с аэротенком и вторичным отстойником используют в г. Сита (Италия). В нем на общем валу с частотой вращения 2 мин^{-1} размещено 108 полиэтиленовых дисков диаметром 2,3 м и общей площадью 1150 м². При 40%-й площади погружения дисков в сточные воды и расходе последних 0,1-3,2 л/с степень удаления ХПК составляет 80-90%.

4.3.5.4. Направления интенсификации и стоимость биохимической очистки

В последнее время разрабатывается ряд направлений интенсификации биохимической очистки сточных вод и улучшения ее технико-экономических показателей.

К факторам интенсификации для аэротенков относятся использование окситенков, применение ультразвука, двухстадийная технология анаэробного сбраживания, сочетание анаэробно-аэробных методов и некоторые другие.

Окситенки — модификация аэротенков, в которые вместо сжатого воздуха подают кислород при повышенной концентрации активного ила, что позволяет существенно интенсифицировать процесс очистки. Дозу активного ила в окситенке можно повышать до 15 г/л, концентрацию растворенного кислорода — до 10 мг/л, скорость биохимического окисления увеличивается в 5-10 раз, степень использования кислорода достигает 95%.

Применение окситенков наиболее перспективно на предприятиях с собственным источником технического кислорода (металлургия, химия, коксохимия, нефтехимия и др.) или имеющих возможность получить его от соседних предприятий.

Использование гидродинамических излучателей ультразвука снижает ХПК по сравнению с традиционной очисткой на 25-30%, иловой

индекс — в 1,3-1,5 раза. Скорость потребления кислорода увеличивается на 25-30%, биологическое окисление субстрата — на 50-80%. При одинаковой степени очистки окислительная мощность традиционных аэротенков с ультразвуковой обработкой активного ила, по данным фирмы «Бионик», в 1,5-2,5 раза превышает окислительную мощность традиционных аэротенков при одновременном снижении энергозатрат на аэрацию иловой смеси (Применение ультразвука...).

Двухстадийная технология анаэробного сбраживания представляет собой комбинацию термофильного и мезофильного режимов.

Как известно, за рубежом распространено *мезофильное* (при 33-37°C) сбраживание осадков городских сточных вод в метатенке в течение 20-25 сут. Оно характеризуется высокими степенями распада беззольного вещества осадка, его водоотдающих свойств и выхода биогаза, минимальным расходом тепла на поддержание требуемой температуры и, в связи с длительными сроками обработки, значительными капитальными затратами. В отечественной практике наиболее распространено *термофильное* (при 50-55°C) сбраживание в течение 5-7 сут. Получаемые при этом степень распада и водоотдающие свойства осадка недостаточны.

Испытания термофильно-мезофильного сбраживания проведены на московских станциях аэрации в 1995-1997 гг. Они предусматривали проведение ключевой стадии сбраживания осадков сточных вод (гидролиз твердого вещества) в термофильном режиме, а дальнейший процесс, с целью повышения водоотдающих свойств осадков, осуществлялся в мезофильных условиях. Оптимальный режим: проведение первой стадии при 65°C в течение 0,6-1,0 сут, второй — не менее 10 сут при 30°C. В этом случае в сравнении с мезофильным режимом количество беззольного вещества увеличивалось в 1,2-1,6 раза, расход флокулянта на обезвоживание снижался на 40-50% (Савельева...).

Сочетание анаэробно-аэробных методов включает анаэробную обработку локальных стоков или общего потока сточных вод на первой ступени, анаэробно-аэробную очистку — на второй, глубокую аэробную очистку — на третьей. Эта схема может обеспечить любую степень очистки вплоть до достижения ПДК (кроме фосфора).

Важным фактором интенсификации биохимических процессов служит использование в различных типах реакторов гранулированной биомассы (без наличия носителя). Сорбционная емкость такой биомассы увеличивается в 3-4 раза, сохраняется ее высокая активность даже при длительном хранении.

Для производств с объемом сточных вод 4500-36000 л/сут применяют колонны с реакторами КС, имеющие высоту 4,5-5,6 м и диаметр

более 0,45 м. В реакторе размещают 80-100 кг гранулированной биомассы слоем 1,8-2,1 м, очищаемый раствор подают снизу (Сидельникова).

Другим направлением совершенствования реакторов является сочетание аэротенка и модуля с фильтровальной мембраной из органических полимерных материалов, позволяющих разделять иловую смесь на твердую и жидкую фазы (Технология...).

Проявляется тенденция использования смешанных культур микроорганизмов, которая характеризуется более высокой степенью селективности очистки, например от цветных металлов.

При очистке сточных вод от цветных металлов для регенерирования биомассы металлы из нее элюируют соответственно кислыми или щелочными растворами, содержащими комплексообразующие добавки.

В ряде случаев биосорбенты сжигают, не регенерируя.

Расширение внедрения биохимических методов сдерживается некоторыми особенностями, вытекающими из сущности процесса. К ним относятся снижение активности биомассы при нестабильном составе стоков, необходимость обеспечения непрерывной подпитки их биогенными элементами и разбавления высококонцентрированных систем.

Стоимостные показатели некоторых методов биохимической очистки, представленные в табл. 4.2, достаточно близки, за исключением более дешевых стабилизационных прудов. Однако область применения последних ограничивается территориями с жарким климатом.

Таблица 4.2

Капитальные и эксплуатационные затраты
биохимических методов очистки (Performance...)

Метод	Расходы	
	капитальные	эксплуатационные
Аэротенки	660	0,7
Биофильтры	500	0,6
Гидропоника и участки с тростником	400-50	0,4-0,5
Аэрируемые пруды	400	0,6
Стабилизационные пруды	230	0,4

Примечание. Капитальные расходы — ф. ст./чел., эксплуатационные — ф. ст./($\text{м}^3/\text{год}$).

Обоснованный выбор того или иного метода биохимической очистки может быть выполнен лишь на основании детальных технико-экономических расчетов применительно к особенностям конкретного региона.

4.4. Современные технологические схемы очистки воды

4.4.1. Сточные коммунальные

Дошедшие до нас памятники далекого прошлого и имеющиеся записи свидетельствуют, что еще в глубокой древности люди умели организованно отводить атмосферные и загрязненные воды. Так, при раскопках в Египте обнаружены каналы для сточных вод, построенные за 2500 лет до н.э. Такие же сооружения существовали еще раньше в Индии, более совершенные — в городах древних Греции и Рима.

Политическому и экономическому упадку культуры Древнего мира соответствовал упадок строительства вообще и канализационных сооружений в частности. Такое же положение наблюдалось в Западной Европе в эпоху Средневековья. В этот период даже наиболее крупные города буквально утопали в нечистотах. Широко распространившиеся инфекционные заболевания и участвовавшие эпидемии опустошали Европу. Это обстоятельство и совершенно нетерпимые санитарные условия заставили власти уделять большее внимание вопросам благоустройства. Однако только в 19 в. в некоторых городах Западной Европы была построена канализация. И если в конце 17 в. в городах Германии нечистоты зачастую сливались непосредственно на пригородные луга, то в середине 19 в. их отводили на поля фильтрации. Уже более 100 лет используют орошаемые биофильтры.

В настоящее время системы очистки сточных вод являются одними из наиболее сложных в народном хозяйстве различных стран. Так, в весьма канализованной Германии для сбора и отведения сточных вод имеется ~400 тыс. км уличных сетей и каналов. Из них бетонные трубы составляют 45%, столько же — железобетонные и керамические, около 4% занимает кирпичная кладка и менее 2% — трубы из полимерных материалов. Наиболее перспективные трубы (из керамики) долговечны, разнообразны по размерам (диаметр 100-800 мм, длина до 2,5 м), выдерживают давление до 2,4 атм, удовлетворяют самым высоким европейским стандартам. Возраст труб: до 25 лет — 36%, 26-50 лет — 36, 51-75 лет — 10, 76-100 лет 14, свыше 100 лет — 4% (Bergez...).

Система канализации Германии, по различным данным, в 1995 г. охватывала 89-95% населения страны, в том числе 85% ее составляла биохимическая очистка. Общее число очистных сооружений превышало 10 тыс., в том числе с производительностью более 100 тыс. экв. жи-

телей — 280, от 20 до 100 тыс. — 1084 и до 1 тыс. — 4343. Суммарный ежегодный объем очищаемых стоков достигал почти 10 млрд м³, осадков сточных вод — 23 млн м³, или 2,5 млн т по сухому веществу.

Наиболее полные из известных автору сведения о затратах на переработку сточных вод приводят Г.Доусон и Б.Мерсер (табл. 4.3). Условия реализации некоторых способов изложены ниже.

Предполагается, что при разделении твердых и жидких фаз (физические методы очистки) затраты на вакуумную фильтрацию и центрифугирование прямо не связаны с объемом стоков, но зависят от количества осадка, известкового по составу, выход которого равен 2045 кг по сухому веществу в сутки. Осадок после первичного (гравитационного) осаждения подается на вакуум-фильтр или центрифугу в виде 10%-й пульпы. Первичное осаждение ведется с нагрузкой 2400-4900 л/(сут·м²). Объем фильтрации через гранулированную насадку составляет 63 л/(мин·м²) при 12-часовом рабочем дне. Затраты на обработку паром оценены применительно к сточным водам нефтепереработки.

В химических методах очистки известью нейтрализуют раствор с 1%-й концентрацией серной кислоты.

В физико-химических методах стоимость ионообменной очистки рассчитана для стоков металлообработки, содержащих, мг/л: Zn²⁺ — 15; Cu²⁺ — 0,5; CN⁻ — 19 и Cr⁶⁺ — 22. Затраты на адсорбцию оценивались для ХПК стоков, равного 20-100 мг/л, при нагрузке 0,1-0,3 кг на 1 кг активированного угля. Обратный осмос приложили к промывочным водам никелирования с целью повторного использования никеля. Затраты на экстракцию определили применительно к переработке 1,5%-го раствора фенола с регенерацией растворителя (толуола) дистилляцией и паровой обработкой очищенной воды.

В биохимических процессах расчеты приведены для сточных вод с БПК 1300 мг/л при количестве подаваемого кислорода 0,25 кг на 1 кг взвешенного аэробного вещества и его концентрации 2000 мг/л. Аэрационные лагуны применены для переработки сточных вод с БПК 2100 мг/л при их выдержке 7 сут. На поля орошения сбрасывали отработанный ил в концентрации 0,11 кг/м³ при объеме стоков 3,8 тыс. м³. Нагрузка составляла 22 т/(га·год).

Данные Г.Доусона и Б.Мерсера можно дополнить более поздними сведениями по стоимости хлорирования, озонирования и ультрафиолетового облучения, составляющей для установки производительностью 4 тыс. м³/сут соответственно 8,2; 42,5 и 4,5 дол. (Скурлатов...).

Таблица 4.3

Затраты на переработку сточных вод различными методами
(Доусон...)

№ п/п	Метод	Затраты		
		капи- таль- ные	эксплуа- тацион- ные	на 1000 гал.
1	Фильтрация (стационарная)	67	27	0,07
2	Первичное осаждение	450	70	0,19
3	Воздушная флотация	2300	190	0,52
4	Фильтрация через гранулированную среду	1200	190	0,52
5	Вакуумная фильтрация	850	180	0,49
6	Центрифугирование	1000	150	0,41
7	Обработка паром	600	520	1,49
8	Нейтрализация	1500	1200	3,43
9	Химическое осаждение (коагуляция)	500	130	0,36
10	Ионообмен	3500	1000	2,86
11	Адсорбция активированным углем	1600	260	0,71
12	Испарение	1300	5342	8,99
13	Обратный осмос	950	370	1,01
14	Извлечение с помощью рас- творения (экстракция)	1300	770	2,33
15	Извлечение активным илом, включая вторичное осаждение (аэротенк)	1310	270	0,74
16	Аэрационные лагуны	380	57	0,16
17	Использование земли (поля орошения)	67	13	0,04

Примечание. Данные представлены для установок производительностью 3,8 тыс. м³/сут: капзатраты — в тыс. дол., эксплуатационные — тыс. дол./г., затраты — на 3,8 м³.

Представленные оценки являются ориентировочными, так как соотношение затрат на различные методы очистки зависит от многих факторов, прежде всего объема переработки сточных вод и их состава. В целом можно полагать, что относительно недорогими являются физические методы, с затратами на обработку 0,5 дол. и менее, за исключением значительно более дорогого по эксплуатационным и общим за-

тратам метода испарения. Примерно на одном уровне общих затрат находятся химические и физико-химические методы. Однако каждая из рассмотренных групп имеет свою наиболее эффективную область применения. Поэтому полноценная очистка стоков возможна только при комбинировании способов, относящихся к различным группам.

Самые мощные очистные сооружения в настоящее время используют для очистки коммунальных стоков. Современные технические решения станций аэрации крупных городских очистных сооружений, например Москвы, предусматривают: песколовки — вертикальные, горизонтальные, аэрируемые; первичные радиальные отстойники диаметром 33, 40, 54 м с удалением осадка плоскоребрами; аэротенки четырехкоридорные глубиной 5-6 и шириной коридоров 10-12 м с разнообразными технологиями полной биохимической очистки — от раздельной регенерации активного ила до рассредоточенной подачи сточных вод и секционирования коридоров поперечными воздушными завесами; вторичные радиальные отстойники диаметром 33, 40, 54 м с удалением активного ила илососами и плоскоребрами; метатенки — от монолитных объемом 5600 м³ с мезофильным режимом сбраживания до полносборных объемом 8200 м³ с термофильным режимом (Пупырев).

Крупнейшим в Европе предприятием по очистке сточных вод является Курьяновская станция аэрации (КСА), принимающая более половины их от образующихся в Москве. Ее нынешняя проектная производительность составляет 3,125 млн м³/сут, она занимает около 200 га при числе занятых 1735 человек. За пределами городской черты имеются также иловые площадки станции общей площадью 237 га. После очистки сточные воды в основном сбрасывают в р. Москва, причем их объем составляет примерно половину от дебита речной воды. Кроме того, около 100 тыс. м³ доочищенных стоков после их дезинфекции подается в городскую систему промышленного водоснабжения, которой пользуются такие крупные предприятия, как автомобильные заводы «ЗИЛ» и «Москвич».

На КСА используют традиционную технологическую схему, включающую сооружения механической, биохимической очистки и доочистки.

В состав цеха механической очистки входят механизированные решетки с прозором 4-6 мм, аэрируемые песколовки и 16 первичных радиальных отстойников диаметром 54 м при средней глубине 5 м.

Биохимическую очистку ведут по схеме аэрация — вторичные отстойники. Для аэрации применяют четырехкоридорные аэротенки-вытеснители с 50%-й раздельной регенерацией активного ила и подачей воздуха через керамические фильтросные пластины.

На сооружения доочистки сточные воды поступают после вторичных отстойников. Здесь они последовательно проходят две стадии об-

работки: процеживание через барабанные сетки с ломаной поверхностью и размерами ячейки 1 мм^2 , фильтрацию через слой высотой $1,5 \text{ м}$ щебеночной загрузки (фракция $2\text{-}5 \text{ мм}$). Доочистка обеспечивает удаление до 50% загрязнений по взвешенным веществам и до 30% органики по БПК₅.

При очистке сточных вод КСА ежесуточно образуется $13\text{-}15 \text{ тыс. м}^3$ осадков, в том числе первичных отстойников и избыточного активного ила. Их обработка включает сбраживание в метатенках, последующее обезвоживание и депонирование.

В метатенках объемом $117,6 \text{ тыс. м}^3$ поддерживается термофильный режим сбраживания при $50\text{-}52^\circ\text{C}$. Подогрев осадка осуществляется подачей пара во внутренний объем сооружения. С целью рекуперации теплоты внедрен спиральный теплообменник с площадью поверхности 440 м^2 , рассчитанный на пропускание всего объема избыточного активного ила. Это дает экономии $2,5\text{-}3,0 \text{ Гкал/ч}$ тепловой энергии. Метатенки оборудованы пропеллерными мешалками (проектное решение) и, частично, более эффективной газолифтной системой перемешивания осадка, использующей энергию выделяющегося газа (около $9 \text{ тыс. м}^3/\text{сут.}$). Последний полностью утилизируется в котельной станции.

Обезвоживание осадков производят примерно в равных долях механическими средствами и на иловых площадках. Механическое обезвоживание предусматривает предварительную промывку осадка, его гравитационное уплотнение и реагентную обработку 10% -ми растворами хлорного железа и известкового молока при их расходе соответственно $4\text{-}6$ и $15\text{-}25\%$. Затем осадок обрабатывают на вакуум-фильтрах или фильтр-прессах (Храменков...). При обезвоживании осадка на иловых площадках оно может быть значительно ускорено при использовании флокулянтов (Ускоренное...).

Обезвоженный осадок станций аэрации в соответствии с московской «Концепцией развития сооружений обработки и утилизации осадка на период до 2010 г.» предусматривается направлять в экологически безопасные сооружения, создаваемые на территориях бывших иловых площадок с их последующей рекультивацией (Храменков, 1999).

Рассмотренная проектная схема КСА с рядом внедренных усовершенствований соответствует современным требованиям природоохраны (Иванин...).

Во многом повторяют схему КСА Юго-Западные очистные сооружения Санкт-Петербурга производительностью $330 \text{ тыс. м}^3 \text{ СВ}$ в сутки, сданные в эксплуатацию в 2005 г. Отличие состоит в использовании УФ-установки после вторичных радиальных отстойников.

Очищенные стоки содержат, мг/л: БПК₅ — 15, общие азот и фосфор — соответственно 10 и 15 (Кармазинов...).

Еще более совершенные схемы очистки коммунальных стоков используют за рубежом. В частности, на новых полностью закрытых очистных сооружениях одного из районов Франции сточные воды бытового сектора и агропищевой промышленности подвергают тонкослойному осветлению в отстойниках и обработке на погружных биофильтрах с загрузкой из вспученной глины. Осадки обезвоживают на центрифугах. Схема обеспечивает 80%-е извлечение азотных соединений и 92%-е — биоокисленных, удаляет 93% взвешенных коллоидных веществ. Конечное содержание общего азота не должно превышать 2 мг/л, фосфора — 1-2 мг/л, в зависимости от мощности сооружений. Последние оборудованы также эффективными системами шумоподавления и улавливания газов (La nouvelle...; Balloy).

Дальнейший прогресс в очистке СБ за рубежом предполагает использование фильтр-прессов для обезвоживания осадков в составе мобильных установок (Coluot) и использование для этой же цели солнечной энергии (Bux).

В последние годы значительное распространение получили различные методы обеззараживания сточных вод, особенно в США. В Европе они внедряются в основном при выпуске стоков у мест купания и при их повторном использовании. По данным обработки информации о 162 зарубежных станциях, на них применяются, %: хлорирование — 64 (в том числе без дехлорирования — 47); ультрафиолетовая обработка — 33; озонирование — 4; озонифлотация — 0,6. По станциям большой производительности (свыше 100 тыс. м³/сут.) распределение меняется, %: озонирование — 10, хлорирование — 40; ультрафиолетовое облучение — 50. Последний метод используется при производительности более 800 тыс. м³/сут. В целом развитые страны демонстрируют тенденцию к ликвидации систем хлорирования с заменой их ультрафиолетовой обработкой. В частности, на проектируемых станциях США хлорирование не предусматривается вовсе.

Повторное использование сточных вод является актуальной задачей, особенно в районах с засушливым климатом и острой нехваткой пресной воды. Так, в Израиле установлено несколько сотен бассейнов и резервуаров для сбора и повторного использования очищенных сточных вод, объем которых в 2000 г. должен был превысить 300 млн. м³/год. Резервуары имеют глубину 6-15 м и объем от 50 тыс. до 6 млн. м³ (Tech. rap...).

В рамках ограниченного объема данного курса нет возможности выделить и рассмотреть весьма разнообразные схемы очистки про-

мышленных и сельскохозяйственных стоков, определяемые в основном их пестрым составом и количеством отводимых вод.

В заключение отметим стоимость и финансирование удаления сточных вод (на примере Германии).

Результаты анкетного опроса 1025 коммун с системой централизованной канализации (число жителей 27,7 млн чел.) показали, что в частной собственности находится 43% коммунальных предприятий. Платежи (без учета долевого участия в строительстве) составили по Германии 207 марок за человека в год при среднем тарифе для клиентов 4,56 марки/м³ сбросов. Жилой сектор оплачивал 48% затрат, промышленные предприятия — 23, дорожные службы — 17%. Некоторые статьи расходов коммунального хозяйства, %: заработная плата — 16; водоотведение — 25; амортизационные отчисления — 28; налоги на сброс — 5 (Kosten...).

4.4.2. Питьевые

В наши дни состояние водоемов — источников водоснабжения населенных пунктов — претерпевает существенные изменения. При стабильном уровне естественных примесей в воде все чаще фиксируются токсиканты антропогенного характера: пестициды, полиароматические и полихлорированные органические соединения, пахучие вещества и т.п.

Несмотря на тенденцию ухудшения качества воды в источниках, требования к питьевой воде повышаются. Новые нормативы России (СанПиН 2.1.4.559-96) соответствуют рекомендациям ВОЗ и, в отличие от действовавших, включают показатели, определяющие степень паразитарности и вирусного загрязнения воды. Значительно расширен перечень контролируемых показателей и снижены ПДК для ряда токсических органических соединений.

До сих пор базовой схемой очистки для подавляющего большинства водопроводных станций является классическая двухступенчатая. Она предусматривает коагулирование примесей сернокислым алюминием с последующим их отстаиванием и фильтрованием, а также обеззараживание воды хлором на заключительной стадии ее обработки. Однако подобная технология, в силу загрязнения водоисточников некоторыми техногенными веществами и отдельными микробиологическими субстанциями, не гарантирует необходимой степени очистки воды. Кроме того, применение повышенных доз хлора и коагулянта приводит к образованию ряда новых, хлор- или металлоорганических, соединений, зачастую более токсичных, чем их предшественники.

Новейшая мировая практика водоподготовки показывает, что для крупных станций в наибольшей степени подходят технологии, основанные на сочетании традиционных методов обработки с озонированием или сорбцией на гранулированных активных углях (ГАУ). Новая технология позволяет реализовать полную дезодорацию воды и новые нормативные требования по содержанию в ней нефтепродуктов, фенолов, хлорфенолов, ПАУ, различных пестицидов и других токсических соединений. В частности, озонирование перед сорбцией на ГАУ обеспечивает: глубокую деструкцию трудноокисляемых органических соединений, в том числе высокотоксичных, с целью снижения грязевой нагрузки на сорбент; биохимическую очистку на сорбционных фильтрах, что увеличивает срок их службы не менее чем на 40-60%; снижение содержания токсичных хлорорганических соединений; высокую надежность уничтожения вирусных загрязнений; улучшение органолептических свойств воды.

В настоящее время по новой технологии запроектирована Юго-Западная водопроводная станция Москвы производительностью 500 тыс. м³/сут (рис. 4.23).

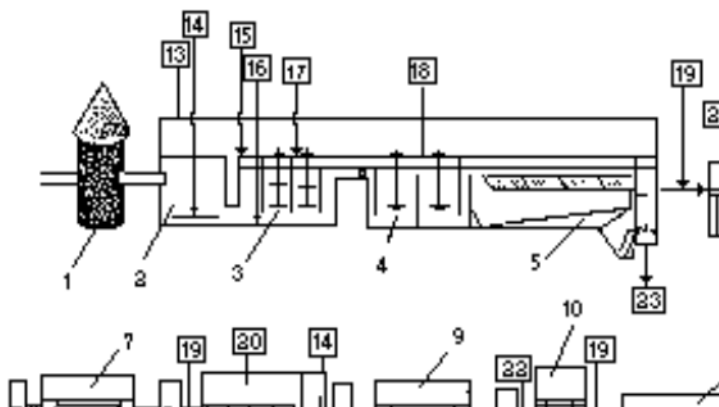


Рис. 4.23. Технологическая схема очистных сооружений Юго-Западной водопроводной станции Москвы:

1 — насосная станция первого подъема; 2 — контактный бассейн углевания; 3 — быстродействующий смеситель; 4 — флокулятор; 5 — тонкослойный отстойник; 6 — контактный резервуар первичного озонирования; 7 — песчаный фильтр; 8 — контактный резервуар вторичного озонирования; 9 — угольный фильтр; 10 — распределительная камера вторичного хлорирования; 11 — резервуар чистой воды; 12 — насосная станция второго подъема; 13 — перманганат калия; 14 — воздух; 15 — коагулянт; 16 — хлор; 17 — уголь ПАУ; 18 — флокулянт; 19 — известь; 20 — озон; 21 — промывная вода; 22 — аммиак, хлор; 23 — осадок на обезвоживание; 24 — в водосток; 25 — в город

Схема включает две ступени озонирования — перед скорыми и адсорбционными фильтрами. Взамен сульфата алюминия используется более эффективный коагулянт — оксихлорид алюминия (ОХА). Его применение приводит к существенному сокращению массы образующегося осадка, что позволяет увеличить продолжительность фильтрации в 1,5-2 раза. Традиционные горизонтальные отстойники заменены тонкослойными, что обеспечивает двукратное освобождение площадей.

При высокой степени очистки воды в естественных условиях может быть применена упрощенная схема. Так, технология водоочистной станции г. Осло (Норвегия), забирающей воду из оз. Маридаль, на берега которого нет свободного доступа, включает предварительное хлорирование, продувку воздухом, отстаивание с малыми дозами коагулянта (ОХА), фильтрование на барабанных микрофильтрах и дезинфекцию (рис. 4.24).

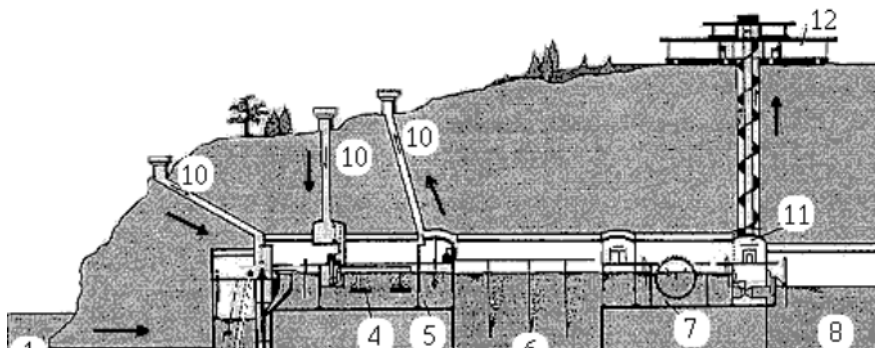


Рис. 4.24. Технологическая схема водоочистной станции:

1 — забор воды из оз. Маридаль; 2 — первичная очистка на вращающихся сетках; 3 — насосная станция первого подъема; 4 — аэрирование воды; 5 — первичное хлорирование; 6 — отстаивание с реагентной обработкой; 7 — микрофильтрация; 8 — вторичное хлорирование; 9 — насосная станция второго подъема; 10 — вентилияция; 11 — контрольный пункт; 12 — наземное административное здание

Станция имеет две параллельные технологические линии производительностью 250 тыс. м³/сут каждая. Управление процессом полностью автоматизировано и компьютеризировано (эксплуатационный персонал станции — 5 чел.). Промывная вода с микрофильтров, шлам из отстойников и бытовые стоки подаются в городскую систему канализации (Порядин).