

РАЗДЕЛ 1. ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ПРИРОДНЫХ ВОД И ВЫБОР ТЕХНОЛОГИИ ЕЕ ОБРАБОТКИ

1.1. Характеристика состава природных вод

1.1.1. Нормативные документы, регламентирующие качество питьевой воды

Рассматривая качество природных вод и требования к степени ее очистки, следует руководствоваться рядом нормативных документов. Основные документы, регламентирующие требования к качеству питьевой воды:

СанПиН 2.1.3684-21. Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий.

СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.

В СанПиН 2.1.3684-21 приведены общие санитарно-эпидемиологические требования к качеству воды питьевого и хозяйственно-бытового водоснабжения. В СанПиН 1.2.3685-21 в соответствующих разделах указаны санитарно-микробиологические и паразитологические показатели безопасности воды систем централизованного питьевого водоснабжения (в том числе горячего водоснабжения), а также ПДК (предельно допустимые концентрации) и ОДУ (ориентировочные допустимые уровни) химических веществ.

До введения указанных СанПиН до недавнего времени использовались:

- СанПиН 2.1.4.1074-01. «Вода питьевая. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. Контроль качества», а ранее – ГОСТ 2874-82* «Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством»;

- СанПиН 2.1.4.2496-09 «Гигиенические требования к обеспечению безопасности систем горячего водоснабжения. Изменение к СанПиН 2.1.4.1074-01»,

- ГН 2.1.5.1315-03. «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования» и ГН 2.1.5.2280-07 «Дополнения и изменения № 1 к ГН 2.1.5.1315-03», по которым ранее нормировался ряд показателей качества воды (алюминий, хлороформ).

Оценку источников водоснабжения и необходимой степени обработки воду следует производить по ГОСТ 2761-84. «Источники централизованного хозяйственно-питьевого водоснабжения. Гигиенические, технические требования и правила выбора».

1.1.2. Состав природных вод. Влияние различных веществ, содержащихся в воде на ее качество

Источниками воды для централизованных систем водоснабжения являются подземные и поверхностные воды и атмосферные осадки, К подземным водам относят: подрусловые, грунтовые, межпластовые, артезианские, карстовые, шахтные. Шахтными называют подземные воды, проникающие в выработанное при добыче полезных ископаемых подземное пространство и проходящие через водоотлив шахты. Состав подземных вод определяется условиями их образования и залегания.

К поверхностным относят воды рек, озер, водохранилищ, прудов, каналов, морей. Их состав определяют почвенно-геологические условия; климатические, геоморфологические и антропогенные факторы.

К атмосферным водам относят осадки, выпадающие в виде дождя и снега, аккумулирующиеся в естественных или искусственных емкостях. Их состав определяется чистотой атмосферы, количеством; гидрогеологическими свойствами грунтов бассейна водосбора, способом их накопления и хранения; условиями, сопутствующими их выпадению.

Природная вода – сложная, непрерывно изменяющаяся система. В состав воды входят: соли, преимущественно в виде ионов, молекул и комплексов, органические вещества – в молекулярных соединениях и коллоидном состоянии; газы – в виде молекул и гидратированных соединений; диспергированные примеси; гидробионты (планктон, бентос, нейстон, пагон); бактерии и вирусы. Во взвешенном состоянии в природных водах содержатся глинистые, песчаные, гипсовые и известковые частицы; в коллоидном – различные вещества органического происхождения, кремнекислота, гидроксид железа (III), фульвокислоты, гуматы; в истинно растворенном состоянии находятся в основном минеральные соли, обогащающие воду ионами. Качество природных вод весьма разнообразно.

С точки зрения водоподготовки наиболее общими и характерными признаками загрязняющих воду веществ являются формы нахождения их в воде. Исходя из этого, Л.А. Кульским предложена классификация примесей воды, основанная на их фазовом состоянии и дисперсности. Эта классификация имеет широкое практическое применение, т.к. дает приемлемое обоснование технологическим приемам водообработки и преследует цель упорядочить выбор состава очистных сооружений. Все примеси разделены на четыре группы.

Размеры взвешенных веществ указаны в таблице 1.1.

Размеры взвешенных частиц

Взвешенные вещества	Размер	Гидравлическая крупность, мм/с	Время осаждения частиц на глубину 1 м
Коллоидные частицы	$2 \cdot 10^{-4} - 1 \cdot 10^{-6}$	$7 \cdot 10^{-8}$	4 года
Тонкая глина	$1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-6} - 17 \cdot 10^{-5}$	0,5 - 2 мес.
Глина	$27 \cdot 10^{-4}$	$5 \cdot 10^{-3}$	2 сут.
Ил	$5 \cdot 10^{-2} - 27 \cdot 10^{-3}$	1,7 - 0,5	10 - 30 мин.
Песок:			
мелкий	0,1	7	2,5 мин.
средний	0,5	50	20 с
крупный	1,0	100	10 с

К первой группе примесей воды относятся взвешенные в воде вещества (от высокодисперсных взвесей до крупных частичек), а также бактериальные взвеси и другие биологические загрязнения. Удалять эти примеси можно как безреагентными, так и реагентными методами.

Вторую группу примесей воды представляют разные типы гидрофильных и гидрофобных коллоидных систем, высокомолекулярные вещества и детергенты, способные в зависимости от условий менять свою агрегативность. Их можно удалять из воды различными методами и технологическими приемами. Например, обработкой воды коагулянтами, флокулянтами, известью, а также хлором, озоном и другими окислителями. При этом снижается цветность воды, уничтожаются микроорганизмы, разрушаются гидрофильные коллоиды, проявляющие защитные свойства по отношению к гидрофобным примесям воды, тем самым создавая благоприятные условия для последующего коагулирования, ускоряется процесс образования и осаждения хлопьев.

Для третьей группы примесей, являющихся молекулярными растворами, наиболее эффективные процессы, обеспечивающие их удаление из воды, – аэрирование, окисление, адсорбция.

Для четвертой группы примесей, представляющих собой электролиты, технология очистки воды сводится к связыванию реагентами ионов, подлежащих устранению, в малорастворимые и малодиссоциированные соединения. При выборе реагентов целесообразно исходить из произведения растворимости образующихся соединений. Произведением растворимости (ПР) называется произведение концентраций ионов в насыщенном растворе малорастворимого соединения, характеризующее его способность растворяться.

Состав природных вод, концентрации и физико-химические свойства содержащихся в них примесей, являются основополагающими при оценке пригодности воды для использования ее различными категориями потребителей.

Температура поверхностных вод подвержена значительным сезонным колебаниям (от 0,1 до 30°C). Подземные воды имеют более стабильную температуру (8-12°C). Наиболее приемлемой для питьевых нужд является вода с температурой 7-11°C.

Прозрачность, мутность и взвешенные вещества характеризуют наличие в воде суспензированных частиц песка, глины, ила, планктона, водорослей, которые попадают в нее в результате эрозии берегов, с дождевыми и талыми водами, взмучивания осадка со дна и т.п.

Мутность – характеристика обратная прозрачности. Прозрачность воды – это предельная высота столба воды (см), через который можно читать текст, набранный стандартным шрифтом (высота букв 3,5 мм). Прозрачность питьевой воды не должна быть менее 30 см.

Количество взвешенных веществ в воде выражается в миллиграммах на литр по каолину (мг/л) или единицах мутности по формазину (ЕМФ).

В соответствии с СанПиН 1.2.3685-21 количество взвешенных веществ в питьевой воде не должно превышать 1,5 мг/л (по формазину 2,6 единицы мутности).

Органические вещества, присутствующие в природных водах, влияют на органолептические показатели их качества. Самыми значительными поставщиками органических веществ в природную воду являются почвенный и торфяной гумус, продукты жизнедеятельности и разложения растительных и животных организмов, сточные воды бытовых и промышленных предприятий.

Гуминовые и фульвокислоты могут находиться в почве в свободном состоянии, в виде солей с катионами щелочных и щелочно-земельных металлов, комплексных и внутрикомплексных соединений с железом, алюминием, марганцем, медью и, наконец, в виде адсорбционных органо-минеральных соединений.

Наземная растительность, высшие водные растения, актино-мицеты и фитопланктон выделяют бесцветные или окрашенные, без запаха или с запахом вещества, часть из которых пре- вращается в гумусовые соединения.

Для водоемов особую опасность представляют сточные воды, в составе которых есть белки, жиры, углеводы, органические кислоты, эфиры, спирты, фенолы, нефть и др.

Цветность воды, т.е. ее окраска, обусловлена присутствием в воде гумусовых и дубильных веществ, жиров, органических кислот и др. органических соединений. Наряду с этим окраска воды может быть вызвана присутствием соединений железа, марганца, сточных вод некоторых производств или «цветением» водоемов.

Наибольшую цветность имеют природные поверхностные воды рек и озер, расположенных в зонах торфяных болот и заболоченных лесов, наименьшую – в лесостепных и степных зонах. Зимой содержание органических веществ в природных водах минимальное, однако в период половодья и паводков, а также

летом в период массового развития водорослей «цветения» водоемов оно повышается.

Наличие в воде органических веществ резко ухудшает ее органолептические показатели, вызывая различного рода запахи (землистый, гнилостный, рыбный, болотный, аптечный, камфорный, запах нефтепродуктов, хлорфенольный и т.д.), повышает цветность, вспениваемость, оказывает неблагоприятное действие на организм человека и животных.

Цветность вод измеряется в градусах платино-кобальтовой шкалы. Для питьевой воды она не должна превышать 20 град. Цветность определяют колориметрически, сравнивая цвет пробы с эталонами шкалы цветности, или применяют фотоэлектроколориметры (спектрофотометры) для измерения оптической плотности.

Окисляемость воды обуславливается присутствием органических и некоторых неорганических примесей, таких, как железо (II), сульфиты, сероводород и др.

Различают перманганатную и бихроматную окисляемость. В связи с возросшим антропогенным загрязнением водоемов и повышением окисляемости природных вод, связанной с присутствием хлорорганики, пестицидов, гербицидов, нефтепродуктов, бензола и др. СанПиН 1.2.3685-21 ограничивает окисляемость питьевой воды до 5 мгО₂/л. Характерно, что окисляемость воды после коагулирования, отстаивания и фильтрования снижается меньше, чем цветность.

Привкусы и запахи, встречающиеся в природных водах, могут быть естественного или искусственного происхождения. Они зависят от химического состава примесей и температуры.

Запахи и привкусы придают воде сероводород, соли железа, сульфаты кальция (вяжущий) и магния (горький), хлорид натрия (солёный), органические вещества (продукты жизнедеятельности микроорганизмов и водная растительность), а также сбрасываемые сточные воды отдельных предприятий.

К запахам естественного происхождения относят ароматический (огуречный, цветочный); болотный (илистый, тинистый); гнилостный (фекальный, сточный); древесный, землистый, плесневый, рыбный, сероводородный, травянистый и др.

К запахам искусственного происхождения относят фенольный, хлорфенольный, камфорный, бензиновый, хлорный и др.

Различают четыре основных вкуса: соленый, горький, сладкий и кислый. Остальные особенности относят к привкусам.

Интенсивность запахов и привкусов определяют органолептически и выражают по пятибальной шкале. Для питьевой воды по нормам СанПиН 1.2.3685-21 запахи и привкусы не должны превышать двух баллов при 20 °С.

Общая минерализация (сухой остаток) – общее количество веществ (кроме газов), содержащихся в воде в растворенном состоянии. Сухой остаток получают в результате выпаривания профильтрованной воды и высушивания задержанного остатка до постоянной массы. В воде, используемой для хозяйственно-питьевых целей, сухой остаток не должен превышать 1000 мг/л, в особых случаях – 1500 мг/л. Сухой остаток, выраженный в мг/л, равен сумме ионов солей, содержащихся в воде. Наличие заряженных ионов в воде определяет ее электропроводность, поэтому солесодержание воды можно также косвенно определить путем измерения электропроводности.

Хлориды и сульфаты благодаря своей высокой растворимости присутствуют во всех природных водах обычно в виде натриевых, кальциевых и магниевых солей. При значительном их содержании вода становится агрессивной по отношению к бетону. Для хозяйственно-питьевой воды предельно допустимое содержание хлоридов Cl^- – 350 мг/л, сульфатов SO_4^{2-} – 500 мг/л.

Щелочность воды определяется суммой содержащихся в воде гидроксильных ионов и анионов слабых кислот – угольной, органических, а также бикарбонатных и карбонатных ионов; измеряется в мг-экв/л.

Жесткость воды обуславливается содержанием в ней солей кальция и магния. Различают карбонатную жесткость (карбонатные и бикарбонатные соли кальция и магния) и некарбонатную (некарбонатные соли кальция и магния – сульфаты, хлориды, нитраты и др.). Сумма карбонатной и некарбонатной жесткости определяет общую жесткость.

Общая жесткость хозяйственно-питьевой воды не должна превышать 7 мг-экв/л, а в особых случаях – 10 мг-экв/л.

Железо и марганец присутствуют в природных водах в формах, зависящих от величины pH, окисляемости и содержания кислорода. Железо может находиться в форме двух – и трехвалентных ионов, органических и неорганических коллоидов, комплексных соединений, в виде тонкодисперсной взвеси, сульфида железа, гидроксида железа (II). В подземных водах при отсутствии кислорода железо и марганец встречаются обычно в форме двухвалентных солей. В поверхностных водах железо и марганец встречаются в виде органических комплексных соединений, коллоидов или тонкодисперсных взвесей.

Вода, содержащая повышенную концентрацию железа неприятна на вкус, причиняет неудобства в быту, оказывает влияние на печень, увеличивает риск инфарктов. Избыток марганца вызывает окраску и вяжущий привкус, заболевание костной системы. Поэтому содержание железа в питьевой воде не должно превышать 0,3 мг/л, а марганца – 0,1 мг/л.

Активная реакция воды является показателем ее щелочности или кислотности и характеризуется концентрацией водородных ионов.

Вода, подаваемая для хозяйственно-питьевых нужд должна иметь pH в пределах 6-9. (pH – отрицательный логарифм концентрации в воде ионов водорода или гидроксидов. Пример $\text{pH} = 7$. Концентрация ионов водорода = 10^{-7} г-ион/л). Для вод большинства природных источников значение pH не отклоняется от указанных пределов.

Азотсодержащие соединения в природных водах могут быть органические и неорганические в виде нитратов NO_3^- , нитритов NO_2^- и аммонийных солей NH_4^+ .

Повышенное количество азота в природной воде в органических соединениях или в аммонийной форме свидетельствует о загрязнении водоисточника сточными водами, как бытовыми, так и производственными. Поэтому в питьевой воде не допускается присутствие органического азота, аммонийного азота и нитритов. В соответствии с СанПиН в питьевой воде допустимое содержание нитратов (по NO_3^-) не должно превышать 45 мг/л.

Фтор является активным в биологическом отношении микроэлементом, содержание которого в питьевой воде должно поддерживаться в пределах 0,7-1,5 мг/л (в зависимости от климатических условий).

Растворенные в воде газы – кислород, углекислый газ, сероводород, метан, азот. Углекислота, кислород и сероводород при определенных условиях коррозионные свойства по отношению к металлам и бетонам.

Углекислота содержится во всех природных водах. В зависимости от pH, она может быть в виде растворенного в воде газа CO_2 , бикарбонат-ионов HCO_3^- , карбонат-ионов CO_3^{2-} .

Кислород попадает в воду при ее контакте с воздухом. Резкое снижение содержания кислорода в воде указывает на ее загрязнение. Растворенный в воде кислород интенсифицирует коррозию металла, поэтому в питательной воде теплоэнергетических установок его концентрация строго ограничивается.

Сероводород придает воде неприятный запах, вызывает коррозию металла. Присутствие H_2S в хозяйственно-питьевой воде не допускается. Сероводород встречается в основном в подземных водоисточниках, образуясь в результате процессов восстановления и разложения некоторых минеральных солей (гипса, серного колчедана и др.). В поверхностных водах он почти не встречается, так как легко окисляется. Появление его в поверхностных источниках может быть следствием протекания гнилостных процессов или сброса неочищенных

сточных вод. В зависимости от величины pH кроме газообразного растворенного H_2S в воде могут присутствовать ионы HS^- и S^{2-} .

Азот в природные воды поступает из воздуха, а также при разложении органических остатков и при восстановлении азота денитрифицирующими бактериями.

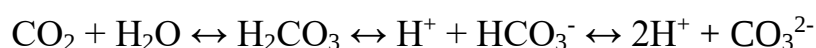
Метан обычно присутствует в болотных водах. В природных водах, используемых для водоснабжения, он может присутствовать в незначительных количествах.

Оксид углерода (IV) присутствует во всех природных водах от нескольких мг/л (поверхностные воды) до сотен мг/л (подземные и шахтные воды). Оксид углерода (IV) в сочетании с гидрокарбонатами обуславливает буферные свойства воды. Угольная кислота встречается в природных водах в форме недиссоциированных молекул H_2CO_3 , гидрокарбонатных HCO_3^- и карбонатных CO_3^{2-} ионов.

Угольная кислота может находиться в свободном и в связанном состояниях. Под свободной угольной кислотой понимают сумму $\text{H}_2\text{CO}_3 + \text{CO}_2$. Поскольку в природных водах концентрация недиссоциированных молекул угольной кислоты H_2CO_3 составляет лишь доли процента от общего количества свободной угольной кислоты, в качестве последней без заметной погрешности принимают концентрацию CO_2 .

В воде поверхностных источников содержание CO_2 не превышает 20-30 мг/л, в подземных неминерализованных водах - 90 мг/л. В подземных водах CO_2 появляется в результате процессов разложения органических соединений, а также в результате биохимических процессов.

Различные формы угольной кислоты в водных растворах связаны так называемым динамическим углекислотным равновесием

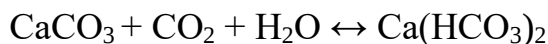


При наличии ионов Ca^{2+} углекислотное равновесие выражается уравнением



Избыточная свободная угольная кислота в отличие от равновесной, очень активна и называется агрессивной.

Агрессивные свойства угольной кислоты объясняются ее способностью взаимодействовать с карбонатными породами и переводить их в растворимые в воде гидрокарбонаты



Действие агрессивной угольной кислоты на бетон состоит в растворении карбоната кальция, образующегося при твердении цемента и переходе его в хорошо растворимый гидрокарбонат.

Бор в питьевой воде в концентрации выше 0,5 мг/л негативно воздействует на человека, ухудшая обмен веществ и вызывая заболевание печени и желудочно-кишечного тракта.

Бром в питьевой воде при содержании свыше 0,2 мг/л уменьшает скорость проведения импульса по нервным волокнам, отрицательно сказывается на функции печени и почек, обуславливает снижение калия в крови и увеличивает содержание азота в мочевины.

Кремний присутствует в природных водах в виде ионов, молекул и коллоидных частичек. Форма содержания кремниевой кислоты в воде зависит от многих факторов и, в первую очередь, от ее ионного состава и значения pH. Кремниевая кислота H_2SiO_3 диссоциирует в две стадии:





Содержание кремния в природных водах в пересчете на SiO_3^{2-} обычно достигает 0,6-40 мг/л и лишь в отдельных случаях может повышаться до 65 мг/л. Кремниевая кислота не вредна для здоровья, однако, повышенное содержание ее в воде делает воду непригодной для питания паровых котлов из-за образования силикатной накипи.

Соединения фосфора встречаются в природных водах в виде суспендированных частиц минерального и органического происхождения, в виде ионов ортофосфорной кислоты или сложного органического комплекса. В природных водах соединения фосфора присутствуют в малых количествах, но оказывают существенное влияние на водную растительность. Концентрация соединений фосфора в питьевой воде не регламентирована.

Иод в природных водах находится в ничтожно малых количествах. Он является очень важным биологическим микроэлементом, содержание которого в питьевой воде не должно быть менее 10^{-8} мг/л во избежание эндемического зоба.

Стронций в концентрации свыше 7 мг/л вызывает урскую болезнь, рахит, ломкость костей.

Кадмий в питьевой воде при содержании свыше 0,001 мг/л вызывает болезнь «Итай-итай».

При избытке **ртути** в питьевой воде (свыше 0,0005 мг/л) возникает болезнь Минамата.

Цинк в концентрациях свыше 5,0 мг/л угнетает окислительные процессы в организме, вызывает анемию.

Медь в питьевой воде, в концентрации свыше 1 мг/л вызывает заболевание печени, гепатит и анемию.

Молибден при содержании в питьевой воде свыше 0,25 мг/л вызывает подагру и молибденовую болезнь.

В природной воде могут находиться микроэлементы, необходимые для человека, но в высоких концентрациях опасные для его здоровья. Их допустимые концентрации в хозяйственно-питьевой воде указаны в СанПиН 1.2.3685-21.

В состав природных вод могут входить также ионы радиоактивных элементов, поступающих в воду в результате вымывания радиоактивных минералов или в результате испытаний атомного оружия и сброса отработанных вод атомных реакторов. СанПиН 1.2.3685-21 также ограничивает содержание радиоактивных элементов в питьевой воде.

Токсические вещества. Ионы As^{3+} , As^{5+} , Se^{6+} , Pb^{2+} и многие другие, относящиеся к ядовитым, в природных водах в естественном состоянии встречаются, как правило, в незначительных количествах и попадают в них в больших количествах в результате сброса неочищенных бытовых и промышленных сточных вод. Наличие в воде нескольких миллиграммов на литр ядовитых веществ оказывает вредное влияние на здоровье человека и теплокровных животных, а также губительное действие на рыб и их кормовые ресурсы, тормозит процессы самоочищения водоемов. К этой группе веществ относятся As, Be, Cu, Mo, Pb, Se, Sr, Zn и др., а также некоторые органические вещества.

Гидробионты, населяющие природные воды, в процессе жизнедеятельности влияют не только на состав окружающей водной среды, но и на качество воды. Они подразделяются на планктон - обитатели, пребывающие в толще воды от дна до поверхности; среди них различают плавающие, пассивно парящие и полуподводные (плейтон) организмы; взвешенные в воде остатки их органического и неорганического происхождения называют детритом; бентос - обитатели, находящиеся на дне водоема; среди них встречаются подвижно или неподвижно прикрепленные, свободно лежащие и ползающие по дну организмы, сверлящие дно, закапывающиеся. Нейстон - организмы, населяющие поверхностную пленку воды и адаптировавшиеся к жизни в специфических условиях ее

поверхностного натяжения; пагон - организмы (моллюски, ракообразные, коловратки и др.), пребывающие зимой в толще льда в состоянии анабиоза, оживающие весной и находящиеся среди бентоса или планктона.

На процессы формирования качества воды и ее самоочищения гидрофация оказывает значительное влияние, так как многие ее представители (зоопланктон и зообентос) используют растворенные органические вещества, некоторые животные - фильтраторы употребляют для питания бактерии, водоросли и т. п.

Гидрофлора водоемов определяется *макрофитами* (высшая водная растительность) и *микрофитами* (водоросли - фитопланктон и фитобентос). При отмирании и разложении макрофитов вода обогащается органическими веществами, появляются пахнущие вещества, которые ухудшают органолептические показатели качества воды.

Микрофиты, подразделяемые на зеленые, сине-зеленые, эвгленовые, диатомовые и др., не только поглощают углекислоту, кислород (а сине-зеленые - азот, включая аммиак), но и продуцируют кислород. Массовое развитие микрофитов в периоды цветения воды создает значительные трудности в технологии улучшения ее качества, особенно для питьевых целей, так как возникает необходимость в дезодорации и микрофильтрации воды.

В природной и питьевой воде определяют фитопланктон – содержание микроводорослей (клеток на 1 мл) и зоопланктон – содержание простейших, ракообразных, коловраток, личинок насекомых и пр. (организмов на 1 м³). Фито- и зоопланктон не нормируется СанНиП, но их содержание в очищенной воде ограничивается и контролируется на станциях водоподготовки.

Бактерии и вирусы из числа патогенных, т.е. паразитов, живущих на живом субстрате, развивающихся в воде, могут вызвать заболевания брюшным тифом, паратифом, дизентерией, бурцеллезом, инфекционным гепатитом, острым гастроэнтеритом, сибирской язвой, холерой, полиомиелитом, туляремией, конъюнктивитом и т.д.

Вирусы - мельчайшие живые существа размерами 16-30 мкм, видимые только под электронным микроскопом. В отличие от бактерий они не имеют клетчатой структуры и состоят из нуклеиновой кислоты, покрытой белковой оболочкой. Они имеют шаро- и кубообразную форму, а также форму прямых и изогнутых палочек. Вирусы являются внутриклеточными паразитами. Среди них встречаются бактериофаги, паразитирующие в клетках бактерий и вызывающие их разрушение и гибель.

Бактерии и вирусы могут интенсивно развиваться в воде. В соответствии с СанПиН 1.2.3685-21 безопасность питьевой воды в эпидемическом отношении определяется ее соответствием нормативам по микробиологическим и паразитологическим показателям. Для питьевой воды определяются микробиологические показатели: общее микробное число ОМЧ (количество колоний бактерий в 1 мл) – не более 50; общие и термотолерантные колиформные бактерии (ОКБ и ТКБ) – отсутствие в 100 мл; колифаги – отсутствие бляшкообразующих единиц (БОЕ) в 100 мл;

При обнаружении в повторной пробе воды вышеперечисленных загрязнений проводятся исследования на наличие патогенных бактерий и вирусов определением цист лямблий (в питьевой воде – отсутствие в 50 л воды) и спор сульфитредуцирующих клостридий (в питьевой воде – отсутствие в 20 мл).

Общее микробное число (ОМЧ) – это число аэробных и факультативно анаэробных гетеротрофных микроорганизмов, использующих для питания органические вещества, обладающих свойством образовывать колонии на питательном агаре, при температуре $(36\pm 2)^{\circ}\text{C}$ в течение 24 ч, видимые при двукратном увеличении. ОМЧ служит санитарно-микробиологическим показателем общего уровня микробного заражения объектов окружающей среды, в том числе воды.

Колиформные организмы являются удобными микробными индикаторами качества питьевой воды и в этом качестве применяются уже много лет. Связано

это, в первую очередь, с тем, что они легко поддаются обнаружению и количественному подсчету.

Термин «колиформные организмы» (или «колиформные бактерии») относится к классу грамотрицательных бактерий, имеющих форму палочек, в основном живущих и размножающихся в нижнем отделе пищеварительного тракта человека и большинства теплокровных животных (например, домашнего скота и водоплавающих птиц).

Кишечная палочка (*Escherichia coli*, или просто *E.coli*) свидетельствует о фекальном загрязнении воды, вызывает кишечные расстройства, протекающие по типу острой дизентерии. *E.coli* обладает одним из самых высоких коэффициентов сопротивляемости среди энтеробактерий.

К бактериям группы ТКБ относятся также отдельные виды *Klebsiella*, *Enterobacter* и *Citrobacter*.

Колиформные бактерии определяются как грамотрицательные, оксидазоотрицательные, не образующие спор палочки, обладающие свойством образовывать колонии в аэробных условиях на селективной дифференциальной лактозной среде с образованием кислоты при температуре $(36\pm 2)^{\circ}\text{C}$ в течение (24 ± 3) ч.

Колифаги – это бактериофаги (вирусы бактерий), способные инфицировать *E.coli* и родственные ей бактерии. Поэтому наличие колифагов свидетельствует о присутствии бактерий-хозяев, а значит, о факте фекального загрязнения воды. Поскольку вирусы (включая бактериофагов) более устойчивы к неблагоприятным условиям окружающей среды, колифаги продолжают обнаруживаться даже тогда, когда самих бактерий-хозяев уже нет. Обнаружение колифагов в пробе воды будет свидетельствовать об имевшем место фекальном загрязнении. Колифаги не встречаются в большом количестве в свежих фекалиях человека и животных, но они широко распространены в сточных водах, поэтому колифаги важны как индикаторы загрязнения воды сточными водами. Учитывая более высокую устойчивость колифагов к

неблагоприятным факторам внешней среды (в том числе к дезинфицирующим мероприятиям), их используют как дополнительный индикатор эффективности водоподготовки. Кроме того, колифаги предложены как индикаторный показатель возможного наличия патогенных энтеровирусов из-за сходства их устойчивости к дезинфицирующим мероприятиям вообще и, в частности, к хлорированию воды.

Международные стандарты рекомендуют отдельное определение количества ДНК и РНК-содержащих бактериофагов ввиду их разной диагностической значимости. Отечественная методика подразумевает определение сразу обеих групп колифагов. Для этой цели используется модельный штамм *E. coli K12* (F+ или Hfr), устойчивый к стрептомицину (strR).

Цисты лямблий – это одна из стадий жизненного цикла лямблий – рода жгутиковых протистов из отряда дипломонадид (*Diplomonadida*). К лямблиям относится один из видов этого рода – кишечная лямблия *Lamblia intestinalis* (синонимы: *Giardia lamblia*, *Giardia intestinalis*, *Giardia duodenalis*) – возбудитель лямблиоза человека. Лямблии паразитируют в тонком кишечнике человека и многих других млекопитающих, а также птиц.

Лямблиоз – протозойное заболевание с различными вариантами течения: бессимптомным и манифестным, со спонтанной элиминацией паразитов или элиминацией, наступающей только после специфической терапии; возможно длительное персистирование паразитов, часто трудно поддающееся специфической терапии. Существует около 40 видов лямблий. Помимо человека, этот вид лямблий может быть обнаружен у различных млекопитающих, а также птиц и рептилий. Некоторые из животных, вероятно, являются резервуаром этой инфекции для человека. Впервые этот возбудитель был обнаружен в фекалиях человека с диареей и описан А.В. Левенгуком в 1681 году. А впоследствии более подробно – в 1859 году патологоанатомом Харьковского университета, профессором Д. Лямблем.

Факторами передачи возбудителя являются – грязные руки, вода, пища, содержащие цисты лямблий. Насекомые (мухи, тараканы, мучные хрущаки, навозные жуки) также могут способствовать распространению цист лямблий. Механизм передачи инвазии – фекальнооральный. Пути передачи – контактно-бытовой, водный, пищевой.

Основным путем передачи считается водный. До 30% манифестных форм связано с данным путем передачи. Реализуется через водопроводную воду, воду открытых водоемов, бассейнов. Водные вспышки могут возникать при попадании в питьевую воду сточных вод.

Цисты лямблий устойчивы и способны сохраняться во внешней среде до 60-70 дней при условии увлажнения. Оптимальными являются температура 2-6°C и относительная влажность воздуха 80-100%. В водопроводной и прудовой воде цисты лямблий выживают в течение 1-3 месяцев при температуре воды от 4 до 20 °C. В сточной воде в летнее время цисты лямблий выживают до 3-4 месяцев. На продуктах питания цисты сохраняются жизнеспособными несколько часов, а при большой влажности продукта и до нескольких суток. Кипячение приводит к мгновенной гибели цист, при температуре 55°C цисты погибают через 5 минут. Высушивание на воздухе в течение 24 ч приводит к полной гибели цист лямблий. Обычные концентрации хлора и время его контакта, рекомендуемые для бактериального обеззараживания воды, неэффективны по отношению к цистам лямблий. Они отличаются высокой кислотоустойчивостью, устойчивостью к щелочам и дезинфицирующим средствам. Водный раствор лизола и нафтализола в 5% концентрации убивает цисты в фекалиях через 30 мин, 2% раствор лизола – в течение 1 часа. Пищевой уксус убивает их в течение 5-10 мин.

Сульфитредуцирующие клостридии (СРК) – это крупные грамположительные спорообразующие палочки, у которых диаметр спор превышает диаметр вегетативной клетки, облигатные анаэробы. Данная группа клостридий обладает свойством восстанавливать сульфиты до сульфидов, что

используется при их идентификации. Поскольку способностью редуцировать сульфиты обладают только споровые анаэробы кишечного происхождения, это позволило выделить данную группу микроорганизмов как санитарно-показательную. Доминирующим представителем СРК является *Clostridium perfringens*. Эта бактерия является постоянным консорбентом кишечного тракта, хотя ее численность значительно ниже, чем *E. coli*. Споры СРК имеют высокую устойчивость в окружающей среде, поэтому их обнаружение в воде может свидетельствовать о давнем фекальном загрязнении. Однако, учитывая, что СРК способны при благоприятных условиях размножаться в окружающей среде (особенно в почве), ценность спор СРК как показателя фекального загрязнения не высока. В то же время, высокая устойчивость спор к агрессивным воздействиям внешней среды и, в том числе, к дезинфицирующим и стерилизующим приемам, делает споры СРК важным индикатором оценки качества обеззараживания воды. При нарушениях и отклонениях в технологии обеззараживания спорообразующие клостридии – первые из бактерий, преодолевающие этот барьер. Кроме того, СРК относятся к индикаторам биологического загрязнения воды: наличие их спор будет указывать на возможное присутствие сходных по устойчивости цист и ооцист простейших и жизнеспособных яиц гельминтов.

В РФ количественный учет спор СРК предусмотрен при санитарных исследованиях воды открытых водоемов и контроле качества водоподготовки. Для определения спор СРК используют железосульфитный агар (среду Вильсон-Блер). В настоящее время для выделения и учета спор СРК существуют коммерческие высокочувствительные и высокоспецифичные среды.

На большинстве производств бактериальное загрязнение воды не препятствует ее использованию для технических целей. Исключение составляют предприятия, для которых требуется вода питьевого качества.

1.1.3. Требования к качеству очищенной воды для различных категорий водопотребителей

Основными показателями, определяющими пригодность воды для разных категорий водопотребителей, являются состав и концентрация содержащихся в ней примесей. По специфике требований к качеству очищенной воды различают воду, используемую для хозяйственно-питьевых целей; нужд пищевой и бродильной промышленности; поения домашних животных и птиц; орошения; охлаждения элементов технологических агрегатов в теплоэнергетике и других отраслях народного хозяйства; питания паровых котлов; технологических целей промышленности; заводнения нефтяных пластов и др.

Хозяйственно-питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения и правила контроля качества воды, производимой и подаваемой системами питьевого водоснабжения населенных мест в России, устанавливаются по СанПиН 1.2.3685-21. В мировой практике используются нормативы всемирной организации здравоохранения ВОЗ и развитых государств с высоким научно-техническим потенциалом: США, Франции, Германии и др.

В соответствии с Федеральным законом «О санитарно-эпидемиологическом благополучии населения» за качеством питьевой воды должен осуществляться государственный санитарно-эпидемиологический надзор и производственный контроль. Количество, виды и периодичность отбора проб воды из водоисточников, а также перед поступлением питьевой воды в распределительную сеть, устанавливается в соответствии с приложением 4 к СанПиН 2.1.3684-21. В качестве примера в табл. 1.2. приведены некоторые гигиенические нормативы содержания вредных веществ в питьевой воде. В четвертой колонке указан лимитирующий признак вредности веществ, по которому установлен норматив:

- с.-т – санитарно-токсикологический;

- орг. – органолептический с расшифровкой характера изменения органолептических свойств воды (зап. – изменяет запах воды и т.д.).

Таблица 1.2

Гигиенические нормативы содержания вредных веществ в питьевой воде

Наименование вещества	Синонимы	Величина норматива в мг/л	Показатель вредности	Класс опасности
Неорганические вещества				
1. Элементы, катионы				
Серебро		0,05	с-т	2
Кобальт		0,1	с-т	2
Аммиак (по азоту)		2,0	с-т	3
Хром		0,5	с-т	3
Кремний		10,0	с-т	2
Натрий		200,0	с-т	2
2. Анионы				
Бромид-ион		0,2	с-т	2
Нитрит-ион		3,0	орг.	2
Сероводород	Водорода сульфит	0,003	орг. зап	4

В пятой колонке указан класс опасности вещества:

- 1 класс – чрезвычайно опасные;
- 2 класс – высокоопасные;
- 3 класс – опасные;
- 4 класс – умеренно-опасные.

Питьевая вода должна быть для человека безопасна в эпидемическом и радиационном отношении, безвредна по химическому составу.

Вода для технологических нужд промышленности в зависимости от ее целевого использования должна отвечать самым разнообразным требованиям. Так, в воде, используемой в горнодобывающей промышленности при добыче, отмывке, гидротранспорте, обогащении и сортировке полезных ископаемых, должны отсутствовать грубые взвешенные частицы. Весьма специфические требования предъявляют к воде, применяемой для обработки готовой продукции, а также к воде, входящей в состав продукта.

Ряд промышленных предприятий предъявляет к воде требования, значительно превышающие лимиты СанПиН 1.2.3685-21. Так, в воде, идущей на изготовление кино- и фотопленки, фотобумаги, не должно содержаться марганца, железа, кремнекислоты, ограничивается окисляемость воды и содержание хлоридов. В воде, применяемой для изготовления растворов кислот и щелочей, красителей и мыла, жесткость, должна быть не более 0,35 мг-экв/л.

Вода для нужд сельского хозяйства (птице- и зооферм, для орошения, мелиорации и др.) по своему качеству должна соответствовать целевому назначению. Для водопоя птиц, зверей и животных на фермах следует подавать воду питьевого качества. При невозможности соблюдения этого требования допускается временно производить водопой животных водой с повышенным минеральным составом, а именно: сухой остаток до $5 \cdot 10^3$, хлориды до $2 \cdot 10^3$, сульфаты до $2,4 \cdot 10^3$ мг/л, общая жесткость до 45 мг-экв/л. Допускается использование воды с повышенной цветностью, с привкусом и запахом, при ее температуре 8-15 °С.

Вода, используемая в прямоточных и оборотных системах водоснабжения, должна удовлетворять требованиям к ее качеству, которые зависят в свою очередь от технологии основных и вспомогательных производств и конструктивных особенностей аппаратов, установок и сооружений, в которых она присутствует и потребляется.

В оборотной и добавочной воде систем охлаждения основными ионами, которые могут приводить к отложениям солей, являются: анионы – бикарбонаты, карбонаты, гидроокиси, фосфаты, сульфаты, силикаты; катионы – кальций, магний, алюминий, железо, цинк.

В большинстве оборотных систем теплообменного водоснабжения карбонатная жесткость воды не должна превышать 2,8-3,0 ммоль/л. Вода не должна вызывать коррозии углеродистой стали и других-металлов, используемых в теплообменной аппаратуре и коммуникациях.

В воде, применяемой для охлаждения различных агрегатов на промышленных предприятиях, содержание взвешенных веществ в воде, подаваемой в конденсаторы, переохладители и компрессоры, не должно превышать 2 мг/л. В воде, поступающей в холодильники на заводах азотной промышленности, содержание взвесей может находиться в пределах 10-50 мг/л, но при этом строго ограничивается щелочность, которая не должна превышать 2-3 ммоль/л, так как в противном случае начнется интенсивная инкрустация теплообменных поверхностей. В этой воде также не должны содержаться биогенные элементы (азот, фосфор), способствующие интенсивному развитию биологических обрастаний.

Высокие требования предъявляются к питательной энергетической воде, зависящие от давления в парогенераторе. К технологической воде, непосредственно контактирующей с сырьем, продукцией, отходящими газами и другими материальными потоками производства, каждое производство предъявляет свои специфические требования.

1.1.4. Методы определения показателей качества природных вод

В настоящем разделе описаны методы определения основных показателей природных вод, используемые при анализе качества природных и питьевых вод.

Качество питьевых и природных вод оценивается комплексом химических, физических и санитарно-бактериологических показателей, определяемых соответствующими анализами.

Химический анализ воды включает в себя элементы качественного и количественного анализа. Цель качественного анализа заключается в обнаружении отдельных ионов или соединений, содержащихся в исследуемой воде. В качественном анализе используются химические реакции, сопровождающиеся определенным внешним эффектом: образованием труднорастворимого соединения, изменением окраски раствора, выделением газа.

Количественный анализ позволяет установить количественное содержание отдельных компонентов в воде. При количественном определении находят весовое или объемное содержание растворенного вещества в определенном объеме или массе раствора. Методы количественного анализа делятся на весовой, объемный, колориметрический и электрометрический. Также для качественного и количественного анализа используются методы атомно-абсорбционной спектроскопии, жидкостной хроматографии, флуорисцентной спектроскопии, ИК-спектроскопии, спектроскопии ядерного магнитного резонанса (ЯМР-спектроскопия); спектроскопии электронного парамагнитного резонанса (ЭПР-спектроскопия) и др.

Весовой анализ. Концентрацию отдельных растворенных компонентов природных вод можно определить, переводя их в труднорастворимые соединения. Получающийся осадок фильтруют, высушивают, прокаливают и взвешивают на аналитических весах с точностью до 0,0002 г. Для фильтрования образующихся осадков обычно используют «беззольные» бумажные фильтры, которые изготавливают из высококачественной целлюлозы. В зависимости от структуры осадка используют фильтры различной плотности. Выпускают фильтры серии красная, желтая, зеленая, белая, синяя лента диаметром от 5,5 до 18,0 см.

Весовой анализ – один из самых точных. При изучении показателей качества воды он применяется для определения плотного, сухого остатков, взвешенных веществ, мутности, содержания сульфатов, магния и др.

Объемный метод (или титрометрический метод) количественного анализа основан на точном измерении объемов реагирующих веществ, концентрация одного из которых известна. Растворы с точно установленной концентрацией называют титрованными.

Процесс прибавления стандартного титрованного раствора к раствору исследуемого вещества называется титрованием. Титрование ведется до достижения точки эквивалентности, т. е. до того момента, когда количество прибавленного стандартного раствора будет эквивалентно количеству определяемого вещества согласно уравнению реакции. Точная фиксация точки эквивалентности является необходимым условием объемного анализа. Для достижения этой цели используют реакции, окончание которых характеризуется определенными внешними признаками – изменением окраски, образованием осадка. Часто для фиксации точки эквивалентности употребляют специальные вещества, изменяющие цвет с изменением концентрации исследуемого иона. Такие вещества называются индикаторами.

Обязательное условие применения индикатора – точное совпадение изменения его окраски с точкой эквивалентности. Чтобы легче уловить момент изменения окраски титруемого раствора (точку эквивалентности), его титруют на белом фоне (на подставку штатива помещают лист белой бумаги). Однако в ряде случаев истинная точка эквивалентности не регистрируется из-за того, что аналитическая реакция в той или иной мере обратима, а также потому, что конечная точка титрования (т. е. изменение цвета индикатора) не совпадает абсолютно с точкой эквивалентности. Поэтому вводят поправочные коэффициенты, которые вычисляют на основании данных, полученных при титровании в тех же условиях растворов с точно известным содержанием определяемого вещества.

Часто для приготовления точных растворов различных веществ (кислоты, основания, соли) используют фиксаналы (или стандарт-титры). Фиксаналы представляют собой точно отвешенную массу вещества или его раствора, запаянного в стеклянную ампулу. На каждой ампуле имеется штемпель или этикетка с обозначением формулы находящегося в ней вещества и его количества – 0,1 или 0,01 г-экв. При количественном перенесении содержимого ампулы в мерную колбу и разбавлении его до 1 дм³ получают точно 0,1 или 0,01 нормальный раствор.

Основные методы титрования могут быть разбиты на несколько групп. Простейший прием титриметрического анализа – прямое титрование, когда к определенному объему раствора анализируемого вещества добавляют из бюретки стандартный раствор реагента с известным титром до достижения точки эквивалентности.

Зная титр раствора и его объем, пошедший на титрование, по уравнению реакции можно рассчитать количество анализируемого вещества, содержащегося в исследуемой пробе, объем которой также известен. Примерами прямого титрования могут служить определения концентраций кислот и щелочей.

В некоторых случаях используют метод обратного титрования (титрования по остатку). Для этого к определенному объему раствора добавляют точно измеренный объем раствора реагента с известным титром, взятый в избытке. Избыток не вступившего в реакцию реагента оттитровывают вспомогательным титрантом точно известной концентрации. Зная общее количество основного реагента и количество его, не вошедшее в реакцию, рассчитывают содержание исследуемого вещества в пробе.

Сущность метода косвенного титрования заключается в том, что к определяемому веществу прибавляют вспомогательный реагент. Это приводит к образованию эквивалентного количества нового вещества, которое и оттитровывается затем стандартным раствором основного реагента.

Согласно правилу эквивалентности вещества вступают друг с другом в химические реакции в строго определенных весовых количествах, соответствующих их эквивалентам, т. е. один грамм-эквивалент одного вещества реагирует с одним грамм-эквивалентом другого. Это правило имеет определяющее значение в объемном анализе, им руководствуются при расчете результатов анализа.

Так как вещества реагируют между собой в весовых количествах, пропорциональных их эквивалентам, то наиболее удобной формой выражения концентрации растворов в объемном анализе является нормальная. Число грамм-эквивалентов определяют по формуле:

$$n = \frac{H \cdot V}{1000} = \frac{a}{\mathcal{E}} = \frac{T \cdot V}{\mathcal{E}}, \quad (1.1)$$

где n – число грамм-эквивалентов растворенного вещества;

H – нормальность раствора, г-экв/дм³;

V – объем раствора, мл;

a – количество растворенного вещества, г;

$\mathcal{E}$ – эквивалент растворенного вещества;

T – титр раствора, г/см³.

Растворы одинаковой нормальности реагируют между собой равными объемами. В случае неравенства нормальностей объемы реагирующих растворов обратно пропорциональны нормальным концентрациям. Если обозначить объем и нормальную концентрацию одного раствора через V_1 и H_1 , а объем и концентрацию второго раствора через V_2 и H_2 , то можно записать

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{H_1}{H_2}, \quad (1.2)$$

Зная нормальную концентрацию H_1 и объемы V_1 и V_2 , можно вычислить нормальность H_2 :

$$H_2 = \frac{V_1 \cdot H_1}{V_2}, \quad (1.3)$$

Если нужно выразить концентрацию в миллиграмм-эквивалентах (C_2), то формула приобретает вид

$$C_2 = \frac{V_1 \cdot H_1 \cdot 1000}{V_2}, \quad (1.4)$$

Если найденный результат необходимо вычислить в весовой форме, то в приведенную выше формулу вводят эквивалент $\mathcal{E}$:

$$C_2 = \frac{V_1 \cdot H_1 \cdot \mathcal{E} \cdot 1000}{V_2}, \quad (1.5)$$

Концентрацию рабочего раствора можно выражать через титр (T) по рабочему или определяемому веществу. Титр по рабочему веществу соответствует количеству граммов вещества, содержащегося в 1 мл рабочего раствора. Например, если $T_{\text{NaOH}} = 0,004$, то это означает, что в 1 мл раствора содержится 0,004 г NaOH. Титр по определяемому веществу показывает количество граммов определяемого вещества, соответствующее 1 мл рабочего раствора. Например, титр 0,1 Н раствора соляной кислоты по NaOH равен 0,004 г/см³. Это означает, что 1 мл 0,1 Н соляной кислоты вступает в реакцию с 0,004 г едкого натра.

Между титром раствора и показателем его нормальности существует следующая зависимость:

$$T = \frac{\Xi \cdot N}{1000}, \quad (1.6)$$

Методы объемного анализа основаны на использовании различных химических реакций. Важнейшими из них являются реакции нейтрализации, окислительно-восстановительные, осаждения, комплексообразования, замещения, присоединения, конденсации.

В основе метода нейтрализации лежит реакция нейтрализации



Метод нейтрализации используют для количественного определения кислот и щелочей. При помощи этого метода проводят также ряд других объемных определений, связанных с реакцией нейтрализации, например, определение солей, образованных сильными основаниями и слабыми кислотами и наоборот, или солей аммония.

Метод нейтрализации используют для определения кислотности, щелочности, карбонатной и устранимой жесткости, содержания различных форм угольной кислоты в воде.

При использовании окислительно-восстановительных методов применяют окислительно-восстановительные реакции, в процессе которых исследуемое вещество количественно переводят в окисленную или восстановленную форму. Количество исследуемого вещества вычисляют по известной концентрации рабочего раствора и его объему, израсходованному на титрование определенного объема исследуемого раствора.

При анализе воды используют окислительно-восстановительные реакции, в которых принимают участие перманганат калия (KMnO_4), бихромат калия ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$), свободный йод (I_2), йодид калия (KI).

Комплексометрические методы основаны на образовании устойчивых комплексных соединений ионов металлов с органическими реактивами. В этих методах исследуемый ион связывается вводимым реактивом в малодиссоциированный комплекс. При проведении анализов часто используют

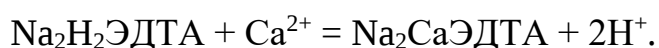
комплексон – трилон Б, представляющий собой двузамещенную натриевую соль этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА).

Для прямого титрования катионов используют специальные индикаторы – органические красители, образующие с катионами окрашенные комплексные соединения, которые менее прочны, чем соединения этих катионов с ЭДТА. Перед титрованием к раствору соли металла добавляют индикатор, при этом образуется определенной окраски комплекс с металлом. Затем раствор титруют трилоном Б, и индикатор вытесняется из его комплекса с катионом. В точке эквивалентности катионы полностью связываются трилоном Б, а индикатор полностью высвобождается. Поскольку свободный индикатор имеет иной цвет, чем в комплексе с катионом, в точке эквивалентности происходит изменение цвета раствора. При комплексонометрическом титровании используют следующие индикаторы:

- мурексид (пурпурат аммония) – переход окраски от красной к сине-фиолетовой;
- эриохром черный Т – переход окраски от винно-красной к синей.

Поскольку многие металлоиндикаторы являются одновременно и рН-индикаторами и изменяют свою окраску при изменении концентрации ионов водорода, перед титрованием в растворе необходимо устанавливать определенное значение рН. Так как во время титрования концентрация ионов водорода повышается, для сохранения постоянного значения рН следует использовать соответствующую буферную смесь. Многие ионы металлов титруют раствором трилона Б в щелочной среде, поэтому перед титрованием в раствор вводят аммиачную буферную смесь (рН = 8 – 10).

Если схематически обозначить формулу трилона Б как $\text{Na}_2\text{H}_2\text{ЭДТА}$, то схему образования комплексоната кальция можно записать



Примером использования комплексонометрического метода в анализе воды является определение общей жесткости, ионов кальция, магния, содержания в воде железа.

Одним из неперенных условий получения правильных результатов в объемном анализе является точное отмеривание необходимых объемов растворов при их приготовлении и проведении процесса титрования. Для выполнения работ в объемном анализе используется мерная посуда: колбы, пипетки, бюретки.

Мерные колбы предназначены для приготовления растворов строго определенной концентрации путем растворения точной навески вещества в дистиллированной воде или другом растворителе либо путем разбавления точно измеренного объема раствора раствором более высокой концентрации. Мерная колба представляет собой плоскодонный стеклянный сосуд с длинным узким горлом (рис. 1.1). Узкое горло колбы обеспечивает более точное измерение объема. На колбе указывают ее емкость и температуру, при которой эта емкость измерена. Мерные колбы изготавливают вместимостью 25, 50, 100, 200, 250, 500, 1000, 2000 мл.



Рис. 1.1. Мерные колбы.

Пипетки предназначены для отмеривания небольших объемов растворов и перенесения точного объема раствора из одной емкости в другую (рис. 1.2). Пипетки бывают двух видов: цилиндрические и с расширением вместимостью от 1 до 200 мл. Цилиндрическая пипетка представляет собой узкий стеклянный цилиндр с делениями вместимостью от 1 до 25 мл с градуировкой шкалы 0,1 или 0,01 мл. Пипетка с расширением представляет собой узкую стеклянную трубку с расширением в средней части. На верхней части пипетки имеется круговая метка, до которой полагается заполнять пипетку раствором, чтобы получить объем, соответствующий ее емкости. Пипетки с расширением более точные, чем цилиндрические.

Для облегчения работы персонала лаборатории и ускорения работы используют микродозаторы – механические пипетки. Они обеспечивают высокую точность и воспроизводимость результатов. Дозируемый объем настраивается ручкой и демонстрируется на экране. Микродозаторы комплектуются легко сменяемыми пластиковыми наконечниками, что позволяет быстро переходить от одного раствора к другому.



Рис. 1.2. Пипетки.

Бюретки предназначены для измерения объема вылитой из них жидкости, поэтому они калиброваны на выливание. Бюретка представляет собой длинную цилиндрическую стеклянную трубку, градуированную по длине на миллилитры

и их десятые доли. Нижний конец бюретки снабжен стеклянным краником или резиновой трубкой со стеклянным шариком и стеклянным носиком (рис. 1.4). Бюретки используют главным образом для титрования. Обычно используют бюретки емкостью 25 и 50 мл.



Рис. 1.3. Микродозаторы (механические типетки).



Рис. 1.4. Бюретки.



Рис. 1.5. Автоматическая (цифровая) бюретка.



Рис. 1.6. Автотитратор.

Для упрощения и ускорения работы используют цифровые (автоматические) бюретки, которые устанавливаются на бутылку с титрованным раствором (рис. 1.5). Подача раствора обеспечивается поворотом ручки, отмеренный объем титранта выводится на дисплей.

Для автоматизации некоторых анализов используют автоматические титраторы, работающие по принципу потенциометрии (рис. 1.6). Прибор постоянно измеряет рН раствора в процессе титрования и регистрирует точку эквивалентности.

С помощью титрования обычно определяют следующие показатели:

- общая жесткость по ГОСТ 31954-2012;
 - щелочность и массовая концентрация карбонатов и гидрокарбонатов по ГОСТ 31957-2002;
 - кальций по РД 52.24.403-2007;
 - хлориды по ГОСТ 4245-72;
 - сульфаты по ГОСТ Р 52964-08
- и другие.

Колориметрический метод анализа основан на измерении интенсивности света, прошедшего через окрашенный раствор. Окрашенные растворы обладают способностью поглощать свет определенной длины волны. Степень ослабления интенсивности проходящего через раствор света зависит от концентрации растворенного вещества. При пропускании луча света с интенсивностью I_0 через окрашенный раствор вследствие поглощения его интенсивность снизится до I_t . Чем больше на пути света, проходящего через окрашенный раствор, попадаетея ионов или молекул вещества и чем больше толщина окрашенного слоя, тем сильнее уменьшается интенсивность проходящего света. Зависимость между концентрацией растворенного вещества, толщиной окрашенного слоя и степенью ослабления интенсивности монохроматического света выражается законом Ламберта – Бера:

$$\frac{\lg I_0}{I_t} = \kappa \cdot C \cdot b, \quad (1.7)$$

где k – мольный коэффициент погашения, зависящий от природы растворенного вещества, температуры и длины волны; C – концентрация окрашенного вещества, моль/дм³; b – толщина окрашенного слоя, см.

Величина $\frac{\lg I_0}{I_t}$ указывает степень ослабления интенсивности света при прохождении через окрашенный раствор. Эта величина называется оптической плотностью, она прямо пропорциональна концентрации окрашенного компонента и толщине поглощающего слоя раствора и обозначается D .

Приборы для определения концентрации исследуемых окрашенных растворов называются фотоколориметрами (рис. 1.7). Действие фотоколориметра основано на свойстве окрашенных растворов поглощать проходящий через них свет тем сильнее, чем выше в них концентрация окрашивающего вещества. Принцип действия прибора заключается в том, что прошедший через раствор световой поток, попадая на фотоэлемент, вызывает в нем электрический ток, сила которого измеряется гальванометром. Сила тока прямо пропорциональна интенсивности падающего на фотоэлемент света. Точность фотоколориметрических определений значительно повышается с применением светофильтров, которые представляют собой стеклянные пластинки, окрашенные в различные цвета, пропускающие лучи только определенной области спектра.

Светофильтр подбирают таким образом, чтобы он пропускал лучи, поглощаемые окрашенным раствором, и задерживал все остальные. При этом ориентируются на так называемые дополнительные цвета. Например, при колориметрировании желтых растворов применяют синие или фиолетовые светофильтры, при колориметрировании синих – желтые или красные.

Для измерения оптической плотности в фотоколориметр, на пути прохождения световых пучков, устанавливают кюветы с исследуемым раствором и дистиллированной водой (рис. 1.8). Кюветы выпускают длиной от

1 до 50 мм, при этом для сильноокрашенных растворов используют малые кюветы, для слабоокрашенных – большие, длиной 30 – 50 мм.

Концентрацию вещества в исследуемом окрашенном растворе определяют методом сравнения или методом калибровочной кривой. Метод сравнения заключается в том, что определяют оптическую плотность исследуемого и стандартного растворов ($D_{\text{исслед}}$ и $D_{\text{станд}}$) и по формуле

$$\frac{D_{\text{исслед}}}{D_{\text{станд}}} = \frac{C_{\text{исслед}}}{C_{\text{станд}}}, \quad (1.8)$$

находят концентрацию исследуемого раствора $C_{\text{исслед}}$, зная концентрацию стандартного раствора $C_{\text{станд}}$.

Метод калибровочной кривой используется при массовых анализах. Для этого вначале находят значения оптической плотности для серии стандартных растворов, причем определение начинают с раствора, имеющего большую оптическую плотность. По полученным данным строят кривую, откладывая по оси абсцисс величину концентрации вещества в стандартных растворах, а по оси ординат $\frac{D_{\text{исслед}}}{D_{\text{станд}}}$ величину оптической плотности. Если раствор подчиняется закону Ламберта - Бера, то калибровочный график представляет собой прямую линию. Определив оптическую плотность исследуемого раствора по калибровочному графику, находят его концентрацию.

Колориметрические методы анализа обеспечивают высокую точность измерения. Нижние границы определяемых концентраций составляют от 10^{-3} до 10^{-8} моль/дм³.

В качестве фотоколориметров используют универсальные приборы – спектрофотометры (рис. 1.7). В современных приборах можно вводить калибровочные кривые в память прибора и получать значения сразу в единицах измерения концентрации.



Рис. 1.7. Фотоколориметры и спектрофотометры.



Рис. 1.8. Кварцевые кюветы и кюветное отделение спектрофотометра.

Для упрощения и ускорения проведения химических анализов, особенно в полевых условиях используют тест-наборы или экспресс-методики, основанные на коллометрическом методе анализа. Сущность экспресс-методик заключается в том, что для каждого показателя создан тест-набор, включающий набор реактивов в различном виде: в сухом виде – в одноразовых пакетах, с отмеренной навеской для одного определения; в виде растворов – в банках, микродозатором или пипеткой. Для определения используют стандартные кюветы, для большей автоматизации и ускорения анализа применяют одноразовые кюветы, в которые уже добавлена навеска индикатора или другого необходимого реагента. Каждому тест-набору соответствует номер методики в памяти прибора, где помимо калибровой кривой, находятся также подсказки для определения по экспресс-методике.

Наиболее простые определения выполняются следующим образом: в две кюветы отмеряется одинаковое количество пробы анализируемой воды (например 10, 20 или 25 мл), в одну кювету высыпается содержимое пакетика из тест-набора, перемешивается, в некоторых случаях добавляется раствор реактива или другой сухой реактив. После перемешивания пробы и выдерживания в течение определенного времени кювета с пробой помещается в спектрофотометр. Предварительно прибор калибруется на ноль по холостой пробе. Некоторые анализы требуют пробоподготовки различной степени сложности аналогично классическим методикам.

Электрометрические методы анализа относятся к наиболее распространенным химико-аналитическим методам. Главными преимуществами их являются высокая селективность, малый расход реагентов. Приборы для электрохимических методов могут быть выполнены в портативной конфигурации, что позволяет решить одну из важнейших задач современной аналитической химии – приблизить анализ к месту отбора проб.

Метод основан на применении гальванического элемента, в котором один из электродов (индикаторный) обратим к ионам водорода, второй электрод

является вспомогательным (электрод сравнения). В качестве индикаторных электродов применяют обычно стеклянные электроды (рис. 1.9а). Электродом сравнения служит хлорсеребряный электрод. Стеклянный электрод изготавливают из стекла, содержащего щелочные металлы (Li, Na, Cs, K, Ca, Mg). Он состоит из стеклянного корпуса, который закачивается шариком, имеющим диаметр 15–20 мм и толщину стенок 0,1 мм. Потенциал поверхности стекла, соприкасающегося с раствором, зависит от pH среды. При погружении электрода в раствор устанавливается равновесие, связанное с переходом H^+ ионов из раствора в стекло и ионов Na^+ или Li^+ из стекла в раствор.



а)



б)



б)



г)

Рис. 1.9. Приборы для электрометрических методов анализа: а) стеклянные комбинированные электроды; б) рН-метр; в) иономер; г) кондуктометр.

Хлорсеребряный электрод состоит из стеклянного корпуса со впаянной асбестовой нитью. Корпус электрода заполнен насыщенным раствором хлорида калия. В верхней части электрода имеется серебряная проволока, на конец которой нанесен тонкий слой хлорида серебра. Для контакта хлорида серебра с исследуемой средой применяется асбестовый фитиль.

В настоящее время преимущественно используются комбинированные электроды, которые в одном корпусе содержат оба электрода и измерительный,

и сравнительный. ЭДС или напряжение на электродах линейно связано с логарифмом концентрации определяемых ионов.

Электрометрический метод используют для определения pH воды (по ПНД Ф 14.1:2:3:4.121-97) в приборах, называемых pH-метрами (рис. 1.9б). В природных водах pH является одним из важнейших показателей, контролирующих присутствие в водном растворе большинства химических элементов и определяющих форму их нахождения в растворе.

С помощью электрометрического метода можно определить концентрацию целого ряда растворенных в воде ионов, для чего используются электроды селективные к различным ионам (NO_3^- , Cl^- , F^- , K^+ , Na^+ и др.). Электродом сравнения в иономере также служит хлорсеребряный электрод. Данный метод анализа отличается простотой и быстротой, но на точность определения сильно влияют мешающие факторы – одни ионы мешают определению других.

Иономеры и pH-метры также позволяют проводить измерение окислительно-восстановительного потенциала (Eh) и также температуры анализируемого раствора.

Еще один прибор, принцип действия которого основан на электрометрическом методе, – кондуктометр (или солемер), предназначенный для измерения электропроводимости растворов или содержания солей (рис. 1.9г). Количество тока, проходящего через раствор соли, находится в прямой зависимости от числа ионов, то есть по электропроводимости раствора можно судить о его концентрации. Наиболее точно по электропроводности можно определить концентрацию раствора, состоящего из одной соли (например NaCl , CaCl_2 , Na_2SO_4), для этого между значением электропроводности, выраженного микросименсах на сантиметр (мкСм/см), либо миллисименсах на сантиметр (мСм/см), или удельного сопротивления, выраженного в Ом·м, и концентрацией раствора (в мг/дм^3 , г/л и т.п.) устанавливается переводной коэффициент. Для сложных многокомпонентных растворов, таких, как природная вода, невозможно вывести универсальный переводной коэффициент,

поэтому измерение общего солесодержания с помощью кондуктометра является приблизительным, однако очень быстрым и простым, что выгодно отличает этот метод анализа от весового анализа сухого остатка.

1.2. Основные технологические процессы и методы обработки воды

1.2.1. Нормативные документы, регламентирующие технические и технологические решения и требования к проектированию, строительству и эксплуатации сооружений очистки природных вод

При проектировании станций водоподготовки, в первую очередь следует руководствоваться СП 31.13330.2012 «Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84*» (далее по тексту СП) и СанПиН 2.1.3684-21 «Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам, жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий».

С введением последнего документа утратили силу СанПиН 2.1.4.1110-02 «Зоны санитарной охраны источников водоснабжения и водопроводов питьевого назначения», СанПиН 2.1.5.980-00 «Гигиенические требования к охране поверхностных вод», СП 2.1.5.1059-01. Гигиенические требования к охране подземных вод от загрязнения и СанПиН 2.2.1/2.1.1.1031-01. Проектирование, строительство, реконструкция и эксплуатация предприятий, планировка и застройка населенных мест. Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов.

При эксплуатации станций водоподготовки используют следующую нормативно-правовую документацию:

ГОСТ Р 51232-98. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества.

ГОСТ Р 56237-2014 (ИСО 5667-5:2006) Вода питьевая. Отбор проб на станциях водоподготовки и в трубопроводных распределительных системах.

ГОСТ ISO/IEC 17025-2019 Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.

ГОСТ Р ИСО 5725-2002 Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Части 1-6.

Правила пользования системами коммунального водоснабжения и канализации в Российской Федерации (с изменениями на 14 октября 2015 года). Утверждены Постановлением Правительством Российской Федерации от 12 февраля 1999 года №167.

МДК 3-02.2001. Правила технической эксплуатации систем и сооружений коммунального водоснабжения и канализации.

Положение о проведении планово-предупредительного ремонта на предприятиях водопроводно-канализационного хозяйства. М, Госстрой России, 2000.

ВСН 58-88(р)/Госкомархитектуры Положение об организации и проведении реконструкции, ремонта и технического обслуживания зданий, объектов коммунального и социально-культурного назначения.

Правила промышленной безопасности опасных производственных объектов, на которых используется оборудование, работающее под избыточным давлением (с изменениями на 12 декабря 2017 года). Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 25 марта 2014 года № 116.

ГОСТ 22.3.01-97. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Жизнеобеспечение населения в чрезвычайных ситуациях. Общие требования (аутентичен ГОСТ Р 22.3.01-94).

ГОСТ 22.3.03-97. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Защита населения. Основные положения (аутентичен ГОСТ Р 22.3.03-94).

ВСН ВК4-90. Инструкция по подготовке и работе систем хозяйственно-питьевого водоснабжения в чрезвычайных ситуациях.

ГОСТ 12.3.006-75 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Эксплуатация водопроводных и канализационных сооружений и сетей. Общие требования безопасности.

Правила по охране труда при эксплуатации коммунального водопроводно-канализационного хозяйства. Утверждены приказом Минземстроя от 22.09.98 №93.

Межотраслевые правила по охране труда при эксплуатации водопроводно-канализационного хозяйства. Утверждены Постановлением Министерства труда и социального развития России от 16 августа 2002 г. №61.

Рекомендации по нормированию труда работников водопроводно-канализационного хозяйства. Утверждены приказом Государственного комитета Российской Федерации по строительной, архитектурной и жилищной политике от 22 марта 1999 года №66.

Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок (с изменениями на 15 ноября 2018 года). Утверждены приказом Министерства труда и социальной защиты Российской Федерации от 24 июля 2013 года №328н (с изменениями на 15 ноября 2018 года).

1.2.2. Выбор технологической схемы обработки воды

Существующие методы обработки воды классифицируются по достигаемой цели очистки, связанной с нормами качества на очищенную воду и

по характеристике фазово-дисперсного состава, извлекаемых из воды примесей при ее обработке на водоочистных водопроводных станциях.

Методы водоочистки по целевому назначению используются для:

- улучшения органолептических свойств воды (осветление, обесцвечивание, дезодорация);
- обеспечения эпидемиологической безопасности (хлорирование, озонирование, электроимпульсная обработка, ультрафиолетовое облучение);
- кондиционирования подземных вод (умягчение, обессоливание и опреснение, дегазация, обезжелезивание и деманганация, фторирование и обесфторивание, стабилизационная обработка, обескремнивание и т.д.);
- извлечения и улучшения газового состава (удаление сероводорода, кислорода, метана, свободной углекислоты и др.);
- извлечение трудноокисляемой органики, вредных продуктов, образующихся попутно при обработке воды (обратный осмос, биосорбция, нанофильтрация и др.).

Методы очистки по сути процессов и природе удаляемых веществ:

- при физико-химических процессах удаляются взвешенные и коллоидные вещества (коагуляция и флокуляция, осаждение и осветление, флотация, фильтрование), растворенные вещества (мембранная сепарация, адсорбция, ионный обмен);
- при химических процессах осуществляется введение химического реагента в обрабатываемую воду и осаждение примесей, протекают реакции нейтрализации окисления и восстановления;
- биологические процессы протекают при аэробной и анаэробной обработке воды, характеризуются бактериальным окислением-восстановлением.

Методы очистки воды по отдельным процессам извлечения или снижения концентрации примесей:

- методы умягчения воды – термический, реагентный, ионообменный, диализ и комбинированный;
- методы обессоливания воды – ионообменный, мембранный (обратный осмос и электродиализ) и дистилляция;
- методы дегазации воды – физический, химический, биохимический и сорбционно-обменный;
- методы стабилизационной обработки воды – фильтрационный, реагентный и аэрационный.

Кульским Л.А. предложен перечень водоочистных процессов для извлечения из очищаемой воды различных групп примесей. Способность примесей воды изменять свое фазово-дисперсное состояние под влиянием физических и химических факторов (в первую очередь, таких как солевой состав, температура, pH среды и другие) позволяет широко варьировать приемы и методы регулирования процессов обработки воды.

Таблица 1.3

Водоочистные процессы для извлечения различных групп примесей в зависимости от их размеров

Гетерогенные системы		Гомогенные системы	
Группа I (10^{-2} - 10^{-5} см)	Группа II (10^{-5} - 10^{-6} см)	Группа III (10^{-6} - 10^{-7} см)	Группа IV (10^{-7} - 10^{-8} см)
Механическое безреагентное разделение	Мембранное разделение	Адсорбция газов и летучих органических соединений	Разделение воды и ионов мембранными методами
Окисление хлором, озоном и др.	Окисление хлором, озоном и др.	Окисление хлором, двуокисью хлора, озоном, перманганатом калия	Перевод ионов в малорастворимые соединения, в том числе и окислением
Флотация суспензий и эмульсий	Коагуляция коллоидных примесей	Экстракция органическими растворителями	Сепарация ионов при различном фазовом состоянии воды

Адгезия на гидроокисях алюминия и железа и высокодисперсных материалах	Адсорбция на гидроокисях алюминия, железа и на глинистых минералах	Адсорбция на активированных углях и других материалах	Фиксация ионов на твердой фазе ионитов
Агрегация с помощью флокулянтов	Агрегация с помощью флокулянтов катионного типа	Ассоциация молекул	Перевод ионов в малодиссоциированные соединения
Электрофильтрация суспензий и электроудерживание микроорганизмов	Электрофорез и электродиализ	Поляризация молекул в электрическом поле	Использование подвижности ионов в электрическом поле
Бактерицидное воздействие на патогенные микроорганизмы и споры	Вирулицидное воздействие	Биохимический распад	Микробное выделение ионов металлов

Таблица 1.4

Область применения технологических схем осветления и обесцвечивания
поверхностных вод для хозяйственно-питьевых целей

Качество исходной воды			Произво- дительность станций*, м³/сут	Технологическая схема и состав сооружений
Взвешенные вещества, мг/л	Цветность, град.	Общее микробное число		
Безреагентные технологии				
< 50	< 50	> 50	1 000	медленные фильтры-обеззараживание
50...700	< 50	> 50	30 000	гидроциклоны-медленные фильтры с рыхлением загрузки и гидросмывом- обеззараживание
> 700	< 50	> 100	любая	гидроциклоны (сетки)- префильтры (отстойники-ковши)-

				медленные фильтры с гидросмывом и рыхлением загрузки-обеззараживание
<i>Реагентные технологии</i>				
< 30	< 50	> 50	5000-10000	реагентное хозяйство-скорые напорные фильтры-обеззараживание
< 20	< 50	> 50	5000-50000	реагентное хозяйство-скорые напорные фильтры-обеззараживание
< 70	< 70	> 50	любая	реагентное хозяйство-контактные осветлители-обеззараживание
< 250	< 250	> 50	любая	реагентное хозяйство-флотаторы-скорые открытые фильтры-обеззараживание
< 2500	< 500	> 50	любая	реагентное хозяйство- горизонтальные отстойники (осветлители со взвешенным осадком) – скорые открытые фильтры- обеззараживание
> 2500	< 500	> 50	любая	первичные отстойники-реагентное хозяйство-вторичные отстойники- двухступенные фильтры- обеззараживание

* уточняется ТЭО

При составлении схемы водообработки следует выбирать методы и режимы, наиболее эффективные для удаления примесей каждой из групп. Желательна предварительная лабораторная проверка и сравнительная технико-экономическая оценка нескольких вариантов.

Совокупность технологических процессов и сооружений составляет **технологическую схему** очистки и кондиционирования воды.

Для разработки технологических схем улучшения качества воды требуются многие данные. Прежде всего, устанавливается целевое назначение воды, т. е. требования потребителя к ее физическим, химическим и бактериологическим показателям; учитывается качество воды самого

источника водоснабжения в разные времена года, степень и возможность загрязнения его бытовыми и промышленными сточными водами и др. Ответственным и сложным этапом является правильная оценка источника водоснабжения. Важно не только определить примеси воды, обуславливающие ее привкусы, запахи, цветность, мутность, жесткость и т. д., но и изучить химические и биологические процессы, протекающие в водоеме и влияющие на стабильность состава воды. Поэтому оценка водоема, как правило, складывается в результате длительного наблюдения за составом примесей воды, за изменением во времени каждого отдельного компонента. Только при таком изучении можно правильно расшифровать данные анализа воды. Кроме того, необходимо проведение предварительных технологических испытаний для обоснования назначаемых параметров работы блоков в целом и отдельных сооружений.

На практике принято различать технологические схемы очистки воды по:

- применению реагентов – безреагентные и реагентные;
- эффекту осветления – для глубокого и неглубокого осветления воды;
- числу технологических процессов – одно-, двух- и многопроцессные;
- числу ступеней технологического процесса – одно-, двух- и многоступенчатые;
- характеру движения обрабатываемой воды – самотечные (безнапорные) и напорные.

Технологические схемы реагентной очистки представлены на рис. 1.10-1.14.

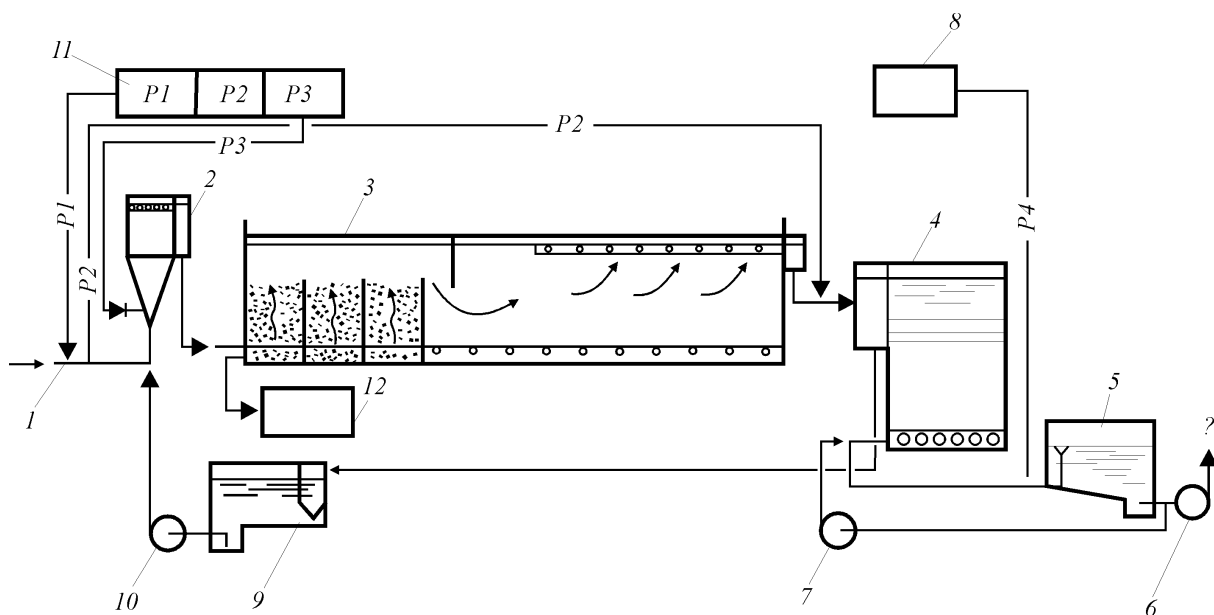


Рис. 1.10. Технологическая схема подготовки питьевой воды с горизонтальными отстойниками и скорыми фильтрами:

1 – подача исходной воды; 2 – смесители вихревые; 3 – отстойники горизонтальные со встроенной камерой хлопьеобразования; 4 – скорые фильтры; 5 – резервуары чистой воды; 6 – насосная станция II подъема; 7 – промывные насосы; 8 – хлораторная; 9 – резервуары усреднители; 10 – насосы для подачи промывной воды на повторное использование; 11 – реагентные хозяйства; 12 – сооружения для обработки осадка; p1 – коагулянт; p2 – флокулянт; p3 – подщелачивающий реагент; p4 – хлор

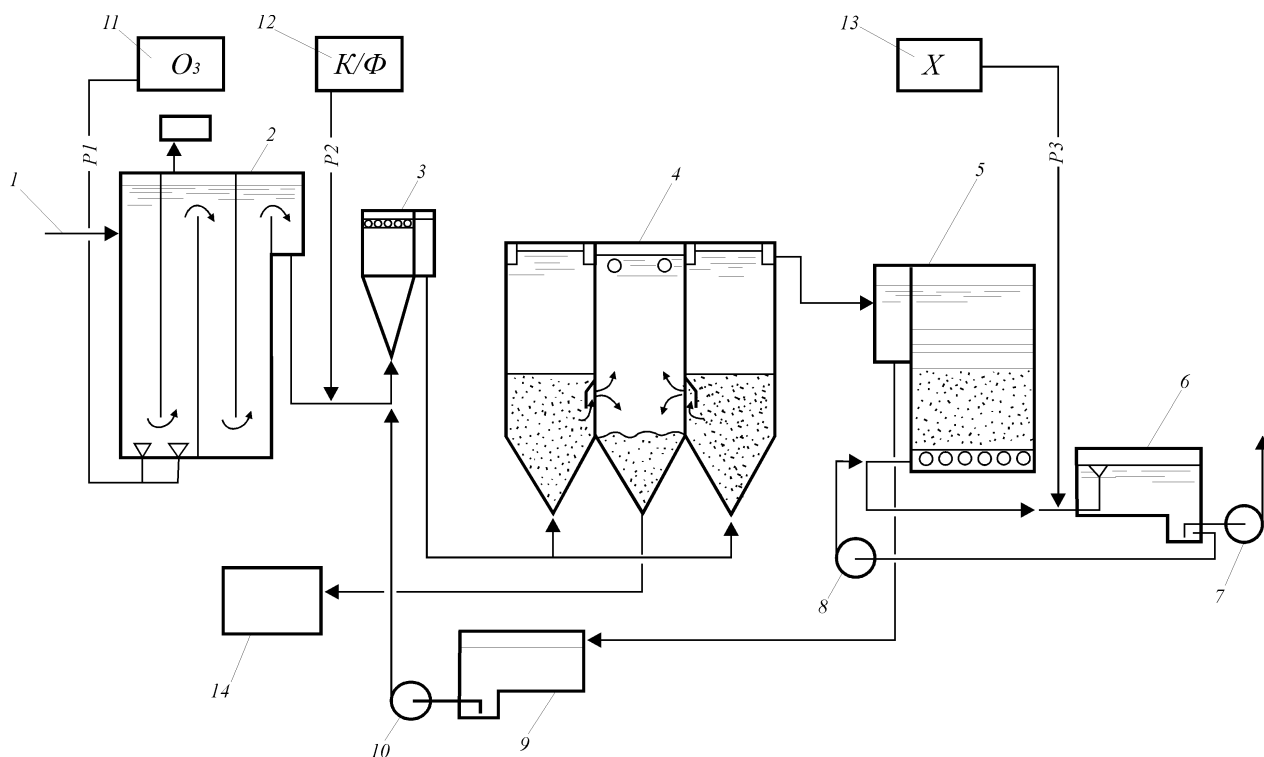


Рис. 1.11. Технологическая схема подготовки питьевой воды с осветлителями со взвешенным осадком и скорыми фильтрами:

[illegible]

Рис. 1.12. Технологическая схема подготовки питьевой воды с контактными осветлителями: 1 – подача исходной воды; 2 – смесители шайбовые; 3 – барабанные сетки или микрофильтры; 4 – контактные резервуары; 5 – контактные осветлители; 6 – резервуары чистой воды; 7 – насосная станция II подъема; 8 – хлораторная; 9 – промывные насосы; 10 – сооружения для обработки промывной воды и осадка; 11 – реагентное хозяйство; 12 – воздуходувки; 13 – резервуар чистой промывной воды; р1 – аммиак; р2 – коагулянт; р3 – хлор; р4 – флокулянт; В – сжатый воздух

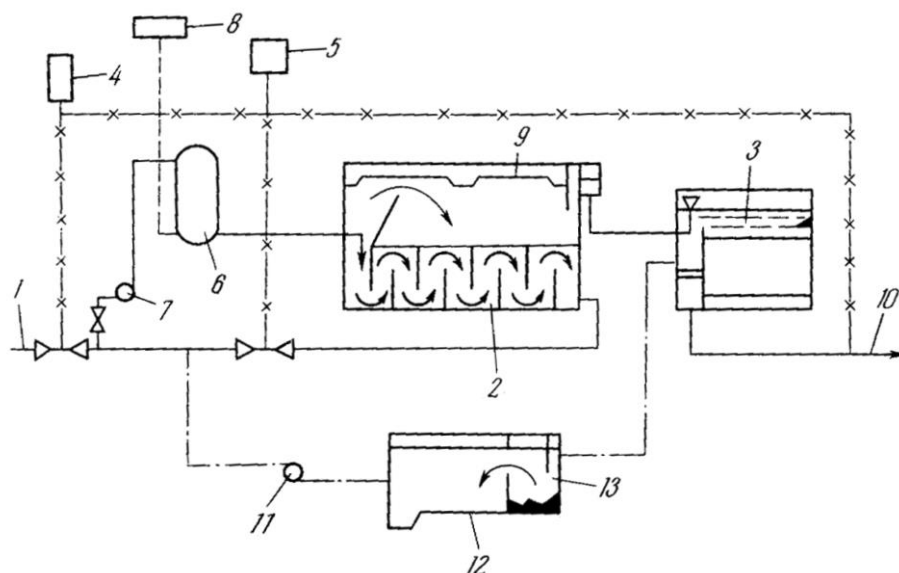


Рис. 1.13. Технологическая схема обработки воды с флотаторами:

1, 10 – подача исходной и отвод обработанной воды; 2 – камера хлопьеобразования; 3 – скорый фильтр; 4 – хлораторная; 5 – баки коагулянта; 6 – напорный бак; 7 – вертикальный смеситель; 8 – компрессор; 9 – флотатор; 11 – насос; 12, 13 – резервуар-усреднитель с песколовкой.

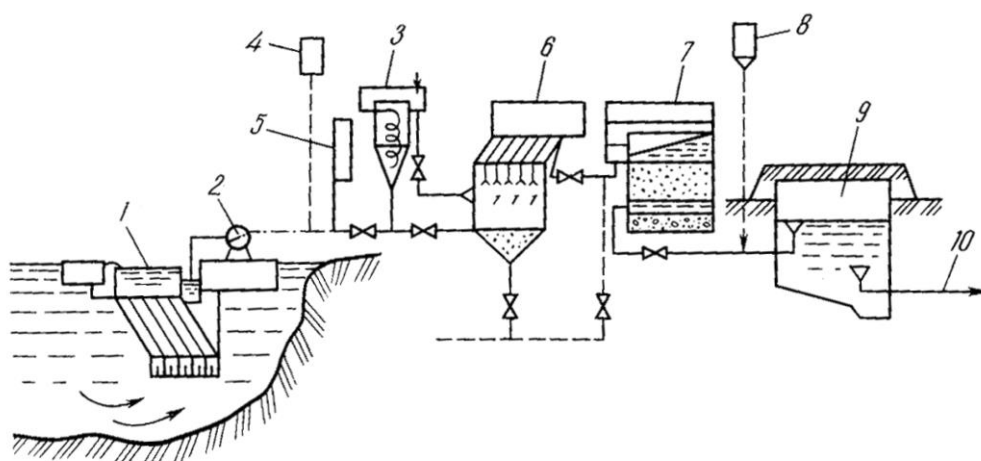


Рис. 1.14. Технологическая схема обработки высокомутных вод:

1 – тонкослойный отстойник на понтонах; 2 – насос; 3 – вертикальный смеситель; 4 – хлораторная; 5 – баки коагулянта; 6 – осветлитель со слоем взвешенного осадка; 7 – скорый фильтр; 8 – фтораторная установка; 9 – резервуар чистой воды; 10 – отвод очищенной воды.

В двухступенчатых схемах на первой ступени применяются отстойники, осветлители со взвешенным осадком или флотаторы, а на второй – скорые фильтры, обеспечивающие полное осветление воды. Такие схемы позволяют получить воду питьевого качества при значительных колебаниях состава

исходной воды. В них достаточно просто решается проблема повторного использования промывных вод фильтров. Сооружения с горизонтальными отстойниками рекомендуются для систем с производительностью более 30 тыс. м³/сут. Отстойники с тонкослойными модулями могут использоваться при любой (в том числе, малой) производительности. Осветлители со взвешенным осадком применяются на станциях любой производительности при соответствующем технико-экономическом обосновании. При этом осветлители со взвешенным осадком не рекомендуется применять при мутности исходной воды менее 50 мг/л. Схема с напорными флотаторами и скорыми фильтрами применяется при осветлении и обесцвечивании маломутных цветных вод, при коагуляции которых образуются не очень плотные рыхлые хлопья, практически не осаждающиеся в отстойниках. Одноступенчатая схема с контактными осветлителями применяется при мутности воды, поступающей на сооружения, не превышающей 70 мг/л и цветности до 70 град.

Для небольших населенных пунктов, питающихся водой, цветность которой в течение года не превышает 50 град., а взвешенные вещества в ней не обладают высокой кинетической и агрегативной устойчивостью, возможно применение безреагентных технологий. Такие технологии базируются на использовании сооружений предварительного осветления воды на гидроциклонах, сетчатых фильтрах различных конструкций, в ковшах-отстойниках, на предварительных фильтрах с зернистой загрузкой. Глубокая доочистка воды в таких схемах осуществляется на медленных фильтрах.

Для очистки природных вод с малой и средней мутностью и цветностью можно использовать технологическую схему с реагентной обработкой и ультрафильтрацией. Производительность сооружений может быть любая. В зависимости от качества исходной воды возможно включение в технологическую схему отстойников или осветлителей со взвешенным осадком, а при обосновании – скорых фильтров.

Подземные воды, используемые в качестве источников водоснабжения, отличаются от поверхностных значительно большим разнообразием по их качественному составу. Они менее подвержены сезонным колебаниям, связанным с изменением климата и воздействием загрязненности селитебных прилегающих территорий.

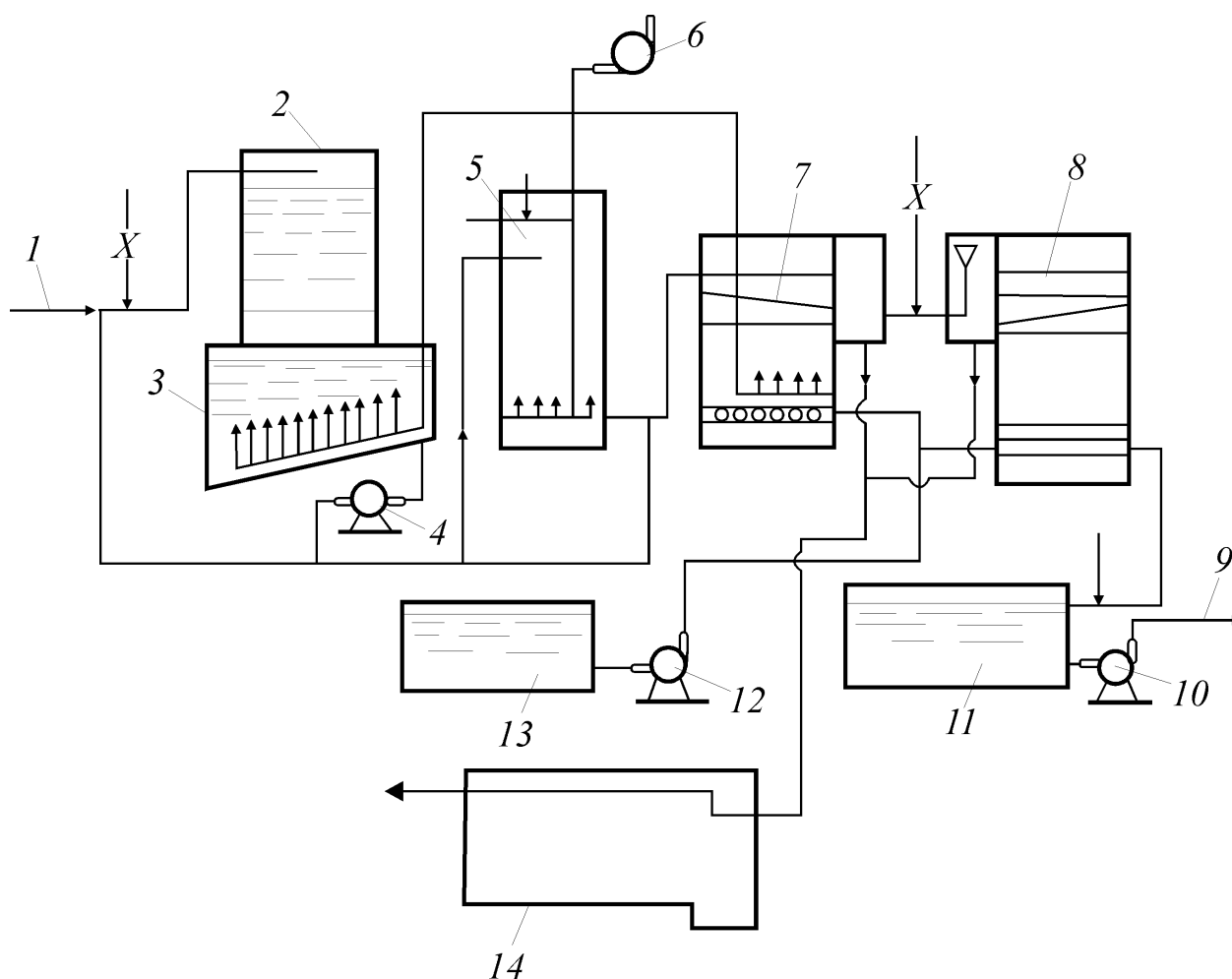


Рис. 1.15. Технологическая схема кондиционирования подземных вод сложного состава:
1 и 9 – подача и отвод обработанной воды; 2 – аэратор – дегазатор; 3 – отстойник; 4 – насос подкачки; 5 – аэратор-смеситель; 6 – компрессор; 7 – осветлительный фильтр; 8 – сорбционный фильтр; 10 – насосная станция II подъема; 11 – РЧВ; 12 – промывной насос; 13 – резервуар промывной воды; 14 – резервуар сбора промывных вод после фильтров; X – ввод хлора

Сложный физико-химический состав подземных вод, используемых для хозяйственно-питьевого водоснабжения, обуславливает многообразие специальных методов их обработки и технологических схем очистки и

кондиционирования воды. Область применения той или иной технологии обусловлена заданным интервалом концентраций основных показателей качества подземной воды: Fe, Mn, H₂S, CO_{2,св}, F, SO₄ (мг/л), pH, Ж_к (мг-экв/л), перманганатная окисляемость (мгО₂/л). Пример технологической схемы кондиционирования подземной воды приведен на рис. 1.15.

Для очистки подземных вод от железа, марганца, ионов жесткости, тяжелых металлов, микроэлементов может использоваться нанофильтрация (обратный осмос) как отдельно, так и в комбинации с другими методами обработки.

Выбор водоочистных методов в условиях повышенных требований к качеству питьевой воды, дефицита финансирования на ввод в эксплуатацию новых мощностей водопроводов и не снижающихся антропогенных нагрузок на водоисточники, является доминирующим при проектировании новых и реконструкции существующих станций подготовки воды. Он производится на основе: сопоставления качества исходной воды, требований к степени ее очистки; потенциальных возможностей включаемых в технологическую схему очистки сооружений и устройств, реагентов и материалов.

При этом должны соблюдаться требования, предъявляемые к технологиям и сооружениям, а окончательное решение должно приниматься на основании расчета технико-экономических показателей и определенных оптимальных режимов работы сооружений в разные периоды года.

Ориентировочный выбор технологической схемы должен осуществляться по классификаторам технологий очистки поверхностных и подземных вод.

1.2.3. Пример современной станции водоподготовки

В качестве примера можно рассмотреть современную технологическую схему очистки воды на Западной станции водоподготовки, введенную в эксплуатацию в Москве. Западная станция обеспечивает питьевой водой юго-

западные и южные районы г. Москвы. Проектная производительность очистных сооружений Западной станции водоподготовки (ЗСВ) составляет 1700 тыс.м³/сут. Комплекс очистных сооружений станции состоит из двух блоков, запроектированных институтом «МосводоканалНИИпроект» и построенных в 1960-1987 гг.:

- блок №1 – Западная станция водоподготовки (ЗСВ) (введена в эксплуатацию 7 октября 1964 г., проектная производительность 900 тыс. м³/сут);

- блок №2 – Ново-западная станция водоподготовки (НЗСВ) (введена в эксплуатацию 17 апреля 1979 г., проектная производительность 800 тыс. м³/сут).

Каждый блок состоит из 4 самостоятельных технологических линий.

В декабре 2006 года была введена в эксплуатацию Юго-западная водопроводная станция (сейчас блок №4 ЗСВ), где были внедрены самые современные технологии водоподготовки. Подробное описание будет представлено ниже.

С 2011 года сооружения Западной станции водоподготовки дополнились озоно-сорбционным блоком (блок №3 ЗСВ) (введен в эксплуатацию: 25 января 2011 г. – первая технологическая линия, 18 февраля 2011 г. – вторая технологическая линия, проектная производительность 250 тыс. м³/сут).

Источником воды для станции является Вазузская гидротехническая система и река Москва с комплексом водохранилищ (Можайское, Рузское, Озернинское, Истринское). Комплекс водозаборных сооружений ЗСВ расположен на правом берегу р. Москвы выше Рублевской плотины. Забор воды осуществляется через водоприемники берегового типа.

На сооружениях ЗСВ применяется двухступенчатая система очистки воды, включающая в себя отстаивание и фильтрование с предварительным хлорированием воды, обработкой коагулянтom (сернокислым алюминием и оксихлоридом алюминия) и флокулянтom «Праестол». В периоды появления в

воде водоисточника неприятных или неспецифических запахов вводится режим спецочистки, включающий дозирование активированного порошкообразного угля или перманганата калия.

После осветления и фильтрации вода поступает в резервуары питьевой воды, где осуществляется вторичное хлорирование и аммонизация – обеззараживание воды. Далее вода питьевого качества двумя насосными станциями 2-го подъема подается потребителю.

На новых сооружениях озоно-сорбционного блока (ОСБ) речная вода после отстаивания и фильтрования обрабатывается озоном в контактных бассейнах и далее проходит сорбционную обработку на угольных фильтрах.

Блок №4, первоначально работавший как самостоятельная станция водоподготовки, совместно с ЗСВ осуществляет обеспечение питьевой водой юго-западного и южного районов города Москвы. Производительность очистных сооружений – 250 тыс.м³/сут. На блоке №4 ЗСВ принята трехступенчатая схема очистки, основанная на отстаивании, фильтровании и мембранной ультрафильтрации. Технологическая схема обработки воды показана на рис. 1.16.

Технологический процесс предусматривает обработку воды реагентами (озоном, перманганатом калия, коагулянт, флокулянт, порошкообразным активированным углем, гипохлоритом натрия и аммиачной водой). В технологической схеме предусмотрено:

- предварительное хлорирование во входной камере (периодическое или постоянное);
- предварительное (первичное) озонирование в камерах реакции с целью окисления органических и минеральных соединений, уничтожения водорослей и поддержания надежного санитарного состояния сооружений;
- коагуляция и флокуляция (полиоксихлоридом алюминия (марка «Аква-Аурат-18») и органическим флокулянт («Праестол-2500») с регулируемым перемешиванием и корректировкой величины pH, а также с

возможностью дозирования порошкообразного активированного угля и перманганата калия;

- осветление в тонкослойных отстойниках, оборудованных скребковым механизмом удаления осадка;
- обработка перманганатом калия в летний период для уничтожения водорослей (за весь период работы станции применялся только в мае 2007 г.);
- последующее (вторичное) озонирование с целью окисления оставшихся в воде органических соединений;
- возможная (если потребуется) дополнительная коагуляция коллоидных веществ и/или обработка порошкообразным активированным углем;
- глубокое осветление на многослойных песчаных фильтрах;
- дозирование порошкообразного активированного угля для окончательного удаления органических веществ, антропогенных примесей и побочных продуктов озонирования;
- глубокое удаление взвешенных веществ и микробиологических загрязнений на ультрафильтрационной установке, включающей стадию предварительной фильтрации и мембранную ультрафильтрацию;
- хлорирование и аммонизация очищенной воды с целью обеззараживания.

Очищенная вода после обеззараживания поступает в сборные резервуары питьевой воды блока №4, откуда насосной станцией II-го подъема НЗСВ подается потребителю.

Комплекс очистных сооружений блока №4 состоит из 4 технологических линий, каждая из которых включает в себя: резервуар первичного озонирования, смеситель с камерой хлопьеобразования, отстойник, резервуар вторичного озонирования, резервуар смешения с ПАУ, резервуар смешения с полиоксихлоридом и ПАУ (1 общая секция на две линии), 5 многослойных фильтров, предварительный накопительный резервуар ультрафильтрационной

Четыре линии работают независимо, потоки смешиваются (1 + 2 и 3 + 4 линии) только в резервуаре смешения ПАУ и полиоксихлорида алюминия и в предварительном накопительном резервуаре ультрафильтрационной установки. В указанных резервуарах предусмотрена возможность гидравлического балансирования потоков по отдельным линиям.

The diagram illustrates the water treatment process for a settlement with a population of 10,000 people. The main flow starts with water intake from the river (Вода из р. Москвы) at the 1st pump station (Насосная станция 1-го подъема). The water then passes through an ozonation contact tank (Контактный бассейн) with an ozone destructor (К деструктору озона), followed by a chemical dosing chamber (Смеситель с камерой хлопьеобразования) where coagulants (Коагулянт), permanganate (Перманганат калия), and sulfuric acid (Серная кислота) are added. The water then moves to a sedimentation tank (Отстойник) with a thin-layer module (Тонкослойный модуль) and a scraper (Скребок). After sedimentation, the water goes through a contact tank (Контактный бассейн) with an ozone destructor. The sediment is sent to sewerage (Удаление осадка в канализацию). The water then passes through a contact chamber (Контактная камера) with a GAV (ГЛАУ) unit, a reservoir for cleaning water (Резервуар-накопитель воды для промывки), a two-stage filter (Двухслойный фильтр, загруженный песком и гидро-антрацитом), and another contact chamber (Контактная камера) with a GAV unit. The water then goes through a preliminary filter (Предварительный фильтр), a membrane ultrafiltration filter (Фильтр с ультрафильтрационными мембранными модулями), a reservoir for cleaning water (Резервуар-накопитель воды для промывки), a reservoir for drinking water (Резервуар питьевой воды) with a GAV unit, and a 2nd pump station (Насосная станция 2-го подъема) before being distributed to the city (В город). A side process for chemical cleaning of the ultrafiltration membranes is also shown, involving a reservoir for cleaning water (Резервуар-накопитель воды для промывки), a pump (Гипохлорит натрия), a reservoir for neutralization after chemical cleaning (Резервуар нейтрализации воды после химической промывки), and a return line to the sewerage system (В канализацию). The legend indicates that the reagents for chemical cleaning are detergents, lactic acid, and sodium bisulfite (Реагенты для химической промывки ультрафильтрационных мембран: детергенты, лимонная кислота, бисульфит натрия).

Рис. 1.16. Технологическая схема 4 блока ЗСВ.



Рис. 1.17. Механические смесители и камера хлопьеобразования



Рис. 1.18. Отстойник с тонкослойными модулями



Рис. 1.19. Скорый фильтр, водовоздушная промывка



Рис. 1.20. Здание реагентного хозяйства (цех гипохлорита натрия, аммиачной воды и активированного угля)



Рис. 1.21. Зал мембранных фильтров



Рис. 1.22. Озонаторная установка

РАЗДЕЛ 2. ОСВЕТЛЕНИЕ И ОБЕСЦВЕЧИВАНИЕ ПРИРОДНЫХ ВОД

2.1. Коагулирование примесей воды

2.1.1. Физико-химические основы коагулирования примесей воды

Примеси, находящиеся в воде, имеют весьма малые размеры, и осаждение их происходит крайне медленно, т.к. силы диффузии превалируют над силами тяжести. Для ускорения процесса осаждения, фильтрования и повышения эффективности осветления и обесцвечивания воды прибегают к коагулированию.

Коагуляция примесей – это процесс укрупнения мельчайших коллоидных и диспергированных частиц, происходящий вследствие их взаимного слипания под действием силы молекулярного притяжения.

В результате коагуляционной обработки коллоидные частицы становятся неустойчивыми и способными к укрупнению. Коагуляция завершается образованием хлопьев и их отделением от жидкой фазы.

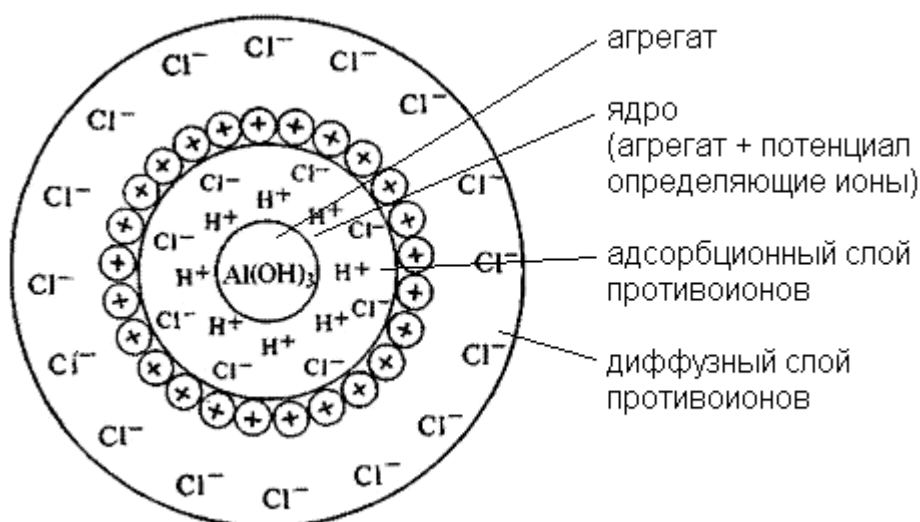


Рис. 2.1. Коллоидная частица золя гидроксида алюминия.

Согласно физической теории устойчивости коллоидных систем на поверхности сформированных ранее в воде агрегатов из молекул и атомов загрязняющих веществ адсорбируются ионы, достраивающие кристаллическую решетку их молекул. Агрегаты молекул вместе с потенциал-образующими ионами составляют электрически заряженное ядро мицеллы (рис. 2.1) , к которому из окружающего раствора за счет электростатических сил притягиваются ионы противоположного знака, компенсирующие заряд потенциал-определяющих ионов. Вследствие этого на поверхности твердой фазы формируется двойной электрический слой. Характер образования двойного электрического слоя определяет электрокинетические свойства высокодисперсных частиц. Из-за теплового движения ионов в воде и их отрыва слой окружающих частиц противоионов приобретает диффузионный характер. Скачок потенциала на границе плотного и диффузного (размытого) слоев противоионов указывает на соотношение полного (φ_o) и электрокинетического (ζ) потенциалов заряженной мицеллы. Коллоидная частица вместе с окружающим ее диффузионным слоем называется *мицеллой*.

Рассмотрим образование мицеллы на примере золя $\text{Al}(\text{OH})_3$. В процессе получения золя по реакции $\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{Al}(\text{OH})_3 + \text{HCl}$ при соблюдении определенных условий синтеза (разбавленные растворы, интенсивное перемешивание) $\text{Al}(\text{OH})_3$ формируется не в виде осадка, образованного крупными частицами, а в виде высокодисперсных (наноразмерных) частиц, которые называют агрегатами. Избыточная энергия образовавшихся частиц приводит к тому, что на них стремятся адсорбироваться молекулы воды и присутствующие в растворе ионы.

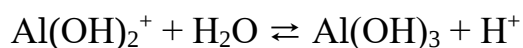
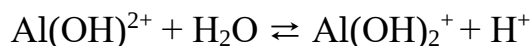
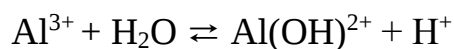
После реакции гидролиза в растворе остаются только ионы H^+ и Cl^- , а также ионы, находящиеся в исходной воде: Na^+ , Ca^{2+} , SO_4^{2-} , HCO_3^- . Возникает вопрос, какие же именно ионы будут адсорбироваться на агрегате $\text{Al}(\text{OH})_3$? Теоретически, любые ионы, чей химический потенциал в растворе выше их потенциала в твердых частицах, будут стремиться адсорбироваться на

поверхности агрегата. Однако логично предположить, что наиболее «охотно» будут адсорбироваться именно те ионы, которые будут образовывать наиболее прочную связь с ионами, входящими в состав агрегата. Очевидно, что такими ионами являются ионы, которые способны достраивать на поверхности частицы кристаллическую решетку нерастворимого соединения (насыщать оборванные связи на поверхности частицы). Описанная закономерность известна как правило Пескова-Панета-Фаянса. В результате достраивания решетки между адсорбированными ионами и агрегатом образуются прочные химические связи со значительной долей ковалентности. В данном примере такими ионами могут быть только ионы H^+ , так как ионов Al^{3+} в растворе практически не остается. Это происходит потому что, в общем случае, достроить решетку нерастворимого соединения способны не только ионы, входящие в состав соединения, но и другие ионы, которые близки по свойствам и размерам (изоморфны) адсорбирующимся ионам (например, ионы Mg^{2+} и Sr^{2+} изоморфны ионам Ca^{2+} , а ионы I^- и Br^- изоморфны иону Cl^-). Ионы Cl^- , присутствующие в рассматриваемой реакционной системе наряду с ионами H^+ , способны притягиваться к агрегату лишь за счет электростатического взаимодействия (особенно слабого с учетом того, что агрегат электрически нейтрален) (рис. 2.1).

Используемые в практике коагулянты чаще всего являются солями слабых оснований и сильных кислот: $Al_2(SO_4) \cdot nH_2O$, $Fe_2SO_4 \cdot nH_2O$, $FeCl_3 \cdot nH_2O$. При растворении они гидролизуют. Взаимодействуя с гидроксильными ионами, содержащимися в воде, эти соли образуют малорастворимые основания. В воде накапливаются ионы водорода и раствор приобретает кислую реакцию.

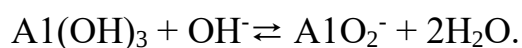
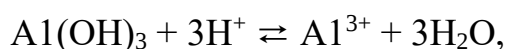
Более полному гидролизу подвержены коагулянты, образующие гидроксиды с меньшей константой диссоциации (величиной, характеризующей способность электролитов диссоциировать на ионы) или меньшим произведением растворимости.

Гидролиз солей алюминия, используемых в качестве коагулянтов, протекает в несколько стадий:

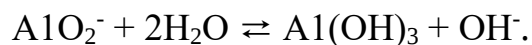


Степень гидролиза повышается с разбавлением раствора, повышением его температуры и pH. Гидролиз усиливается с разбавлением коагулянта.

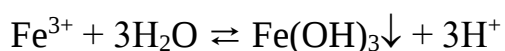
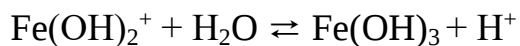
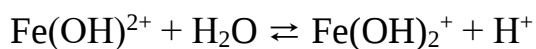
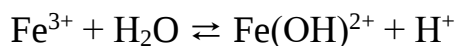
Гидроксид алюминия является типичным амфотерным соединением, т.е. обладает как кислотными, так и основными свойствами:



Необходимым условием для более полного протекания гидролиза является удаление из сферы реакции образующихся $\text{Fe}(\text{OH})_3$ или $\text{Al}(\text{OH})_3$, а также связывание ионов H^+ в малодиссоциированные молекулы. При коагулировании в кислых и нейтральных средах, содержащих небольшое количество гидрокарбонатов, для нейтрализации ионов H^+ , накапливающихся в воде при гидролизе $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, можно применять смесь $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ и NaAlO_2 . В этом случае накапливающиеся ионы H^+ будут нейтрализоваться ионами OH^- , образующимися при гидролизе



Гидролиз FeCl_3 протекает в три стадии:



В тех случаях, когда концентрация ионов OH^- , HCO_3^- , содержащихся в воде, недостаточна для полного гидролиза коагулянта, щелочность воды повышают введением известкового молока или раствора соды. В первом случае *эффект подщелачивания* объясняется связыванием ионов H^+ ионами OH^- извести, во втором - связыванием ионов H^+ в ионы HCO_3^- .

Полнота гидролиза имеет большое значение, как для коагуляции, так и для качества очищенной воды, т.к. концентрация ионов Al^{3+} в питьевой воде строго регламентирована ($\text{Al}^{3+} \leq 0,2$ мг/л).

Процесс коагулирования примесей воды можно улучшить путем удаления углекислоты из зоны реакции продувкой воздухом.

Факторы, влияющие на процесс коагуляции: pH системы; щелочность обрабатываемой воды; условия перемешивания реагента с обрабатываемой водой; наличие в воде естественных взвесей; температура воды; тип и доза коагулянта, солесодержание.

Процесс искусственного обесцвечивания воды согласно современным представлениям протекает следующим образом. При добавлении к очищаемой воде раствора коагулянтов в течение первых 30-180 с происходит гидролиз добавленных солей и образуются коллоидные гидроксиды алюминия и железа, имеющие огромные активные поверхности. Коллоидные примеси, содержащиеся в воде, адсорбируются на поверхности частичек гидроксидов. *При адсорбции следует различать два процесса: собственно адсорбцию и*

фиксацию (закрепление) адсорбированных коллоидов на поверхности. В первом процессе главную роль играют силы межмолекулярного взаимодействия. Адсорбция коллоидных частичек зависит от их дисперсности: она тем больше, чем выше дисперсность и чем меньше устойчивость частичек.

Причины фиксации могут быть различными. Чаще всего необходимость процесса адсорбции гуминов и других коллоидных загрязнений воды на поверхности гидроксидов вызывается образованием особого рода поверхностных соединений - *лаков*. Большое значение в процессе фиксации адсорбированных коллоидов имеет их коагуляция вследствие разноименности зарядов адсорбированных частичек и поверхности адсорбента. Наличие заряда у адсорбирующихся коллоидных частичек влияет на их адсорбируемость.

Коагуляция частичек $\text{Fe}(\text{OH})_3$ и $\text{Al}(\text{OH})_3$, а также связанное с этим выделение их из воды совместно с адсорбированными на их поверхности коллоидными примесями происходит под действием растворенных в воде электролитов. В связи с этим очистка цветных вод с повышенной степенью минерализации протекает обычно лучше, чем мягких, бедных солями вод. Из описанного процесса обесцвечивания следует, что коагуляции подвергаются не коллоидные примеси воды, а образующиеся при гидролизе коагулянтов гидроксиды. Вода очищается не в результате коагуляции, а вследствие адсорбции различных коллоидных и высокомолекулярных примесей на поверхности гидроксидов. Процесс коагуляции гидроксидов фактически приводит к удалению отработанного сорбента из очищенной воды.

Различают процессы коагуляции в *свободном* (конвективная коагуляция) в камерах хлопьеобразования, отстойниках, флотаторах и в *стесненном* объеме (контактная коагуляция) в осветлителях со взвешенным осадком и зернистых фильтрах).

Контактная коагуляция – процесс осветления и обесцвечивания воды, заключающийся в адсорбции примесей с нарушенной агрегативной устойчивостью на поверхности зерен контактной массы. (Нарушение

агрегативной устойчивости происходит при введении коагулянта). Характерной особенностью контактной коагуляции является большая скорость процесса в сочетании с высоким эффектом при меньших затратах коагулянта. Интенсивность прилипания мелких примесей к относительно крупным зернам загрузки намного превосходит скорость агломерации между собой отдельных мелких частиц в свободном объеме жидкости, так как они несут небольшие электрические заряды и значительно легче прилипают к крупным зернам, лишенным зарядов, чем друг к другу. Другими особенностями контактной коагуляции являются независимость процесса от щелочности и температуры воды, меньшее влияние рН воды и др. Контактная коагуляция осуществляется в осветителях со слоем взвешенного осадка, на контактных фильтрах и на контактных осветителях.

Коагуляция сопровождается прогрессирующим укрупнением частиц и уменьшением их общего числа в объеме дисперсионной среды (в нашем случае – жидкости). Слипание однородных частиц называется гомокоагуляцией, а разнородных – гетерокоагуляцией. При гетерокоагуляции в стесненном объеме при сравнительно меньшем размере частиц коллоидов силы тяжести и инерции значительно меньше сил прилипания. В этом случае вероятность и прочность прилипания мелких частиц к поверхности контактной среды (зернистой загрузки скорых фильтров, грубодисперсные фракции осадка в осветителях) выше, чем при слипании мелких однородных частиц между собой.

Гетерокоагуляцией называют прилипание частиц дисперсной фазы к вводимой в систему чужеродной поверхности. Термин «гетерокоагуляция» – это сокращение полного названия: гетерогенная адгезионная коагуляция. По мнению С. С. Воюцкого, одной из причин потери устойчивости дисперсных систем в присутствии чужеродной поверхности является адсорбция стабилизатора на этой поверхности и уменьшение его концентрации в коллоидной системе. Примером гетерокоагуляции может служить отложение коллоидных частиц на волокне, используемое при дублении, крашении и т. д.

Эффективность коагуляции примесей в очищаемой воде оценивают пробным коагулированием по времени образования видимых микрохлопьев, помутнению и осветлению воды в мерных цилиндрах, а также в процессе моделирования работы зернистых фильтров и осветлителей со взвешенным слоем осадка.

Улучшение седиментационных свойств скоагулированных грубодисперсных примесей достигается путем их агрегации (укрупнение) при взаимодействии с растворенными флокулянтами (активная кремниевая кислота, полиакриламид и др.).

В качестве **флокулянтов** применяют высокомолекулярные вещества, полученные из синтетических полимерных органических продуктов. Процесс образования агрегатов из грубодисперсных примесей за счет взаимодействия последних с растворенными флокулянтами, называется *флокуляцией*. При растворении в воде флокулянтов образуются системы, состоящие из макромолекул в виде нитей длиной до сотни микрон, соединенных между собой сегментами.

Электрокоагуляция – метод электрохимической обработки воды, обеспечивающий потерю кинетической и агрегативной устойчивости дисперсных систем. В инженерной практике для генерации и дозирования в воду коагулянта, образующегося за счет электрохимического растворения металлических электродов используют электрокоагуляторы. При погружении в воду металлических электродов и подвода к ним напряжения достаточной величины на поверхности электродов происходит электрохимические реакции, скорость которых определяется значением потенциала на границе «металл-раствор», составом раствора и условиями диффузии в нем. Ионы металла переходят в раствор, гидролизуются и участвуют в коагуляционном процессе аналогично коагулянтам, вводимым в воду в виде растворов.

2.1.2. Теоретические основы коагулирования примесей воды

Одним из наиболее широко применяемых на практике приемов снижения содержания взвешенных и коллоидных примесей в воде является их седиментация (осаждение) под действием сил тяжести. Однако примеси, обуславливающие мутность и цветность природных вод, отличаются малыми размерами, вследствие чего их осаждение происходит крайне медленно, так как силы диффузии превалируют над силами тяжести. Кроме того, наличие примесей коллоидного характера еще более осложняют процесс седиментации. Для ускорения процессов осаждения, фильтрования, флотации и повышения их эффективности прибегают к коагулированию примесей воды (рис. 2.2).

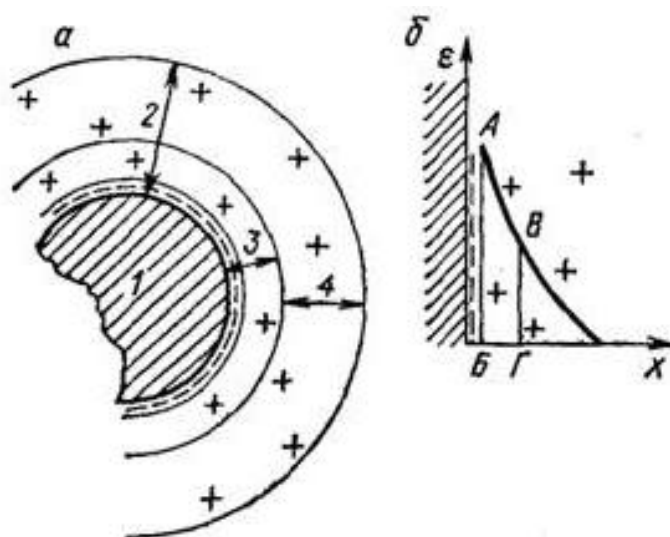


Рис. 2.2. Схема строения коллоидной мицеллы (а) и изменения потенциала (б) в двойном электрическом слое: 1 — ядро; 2 — двойной электрический слой; 3 — его адсорбционная часть; 4 — его диффузная часть; АБ — межфазовый ϵ -потенциал; ВГ — электрокинетический ζ -потенциал; «-» — потенциалоопределяющие ионы; «+» — противоионы

В результате коагуляции образуются агрегаты — более крупные (вторичные) частицы, состоящие из скопления мелких (первичных). Первичные частицы в таких агрегатах соединены силами межмолекулярного взаимодействия непосредственно или через прослойку окружающей (дисперсионной) среды. Коагуляция сопровождается прогрессирующим

укрупнением частиц и уменьшением их общего числа в объеме дисперсионной среды (в нашем случае — жидкости). Слипание однородных частиц называется гомокоагуляцией, а разнородных — гетерокоагуляцией.

Различают два типа коагуляции: коагуляция в свободном объеме (происходит в камерах хлопьеобразования) и контактная коагуляция (в толще зернистой загрузки или в массе взвешенного осадка).

Большинство коллоидов природных вод в отличие от зелей коагулянтов заряжено отрицательно. К таким коллоидам относятся распространенные в природных водах кремниевая кислота, мельчайшие глинистые и почвенные частички, а также гумусовые вещества. Глинистые и почвенные взвеси состоят в основном из гидроалюмосиликатов.

Анионы алюмосиликата образуют основу отрицательно заряженной глинистой частички, окруженной сферой положительных компенсирующих ионов водорода. Величина заряда глинистой частички и его знак зависят от pH воды, в которой суспензирована глина, поскольку при повышении концентрации ионов водорода уменьшается диссоциация алюмосиликатной кислоты, а благодаря этому, и количество свободных ионов, обуславливающих устойчивость коллоидных частичек. Опыт подтверждает, что глинистые взвеси значительно скорее отстаиваются и коагулируют при подкислении воды.

Гумусовые вещества, также имеющие кислотный характер, в природных водах встречаются в виде стойких высокодисперсных отрицательно заряженных зелей. Основу частичек составляют анионы, гуминовых кислот; ионы водорода или металлов составляют внешнюю оболочку двойного электрического слоя.

Таким образом, диспергированные, коллоидные и взвешенные примеси природных вод (дисперсная фаза) в большинстве случаев имеют одинаковые заряды, что обуславливает возникновение межмолекулярных сил отталкивания и агрегативную устойчивость. В технологии очистки воды производят частичное или полное удаление примесей, поэтому их агрегативную

устойчивость стремятся нарушить, заряд их снизить до нуля или очень малых значений. Это достигается добавлением к воде *коагулянтов*: сульфатов алюминия, железа (II и III), хлорида алюминия и железа (III), алюмината натрия, *оксихлорида алюминия* и других веществ, которые либо нарушают агрегативную устойчивость примесей, либо образуют вследствие гидролиза коллоиды, которые их сорбируют.

Примеси природной воды позволяют рассматривать ее как гетерофазную систему, в которой вода является дисперсионной средой, а масса распределенных в воде коллоидных частиц — дисперсной фазой. Эти частицы представляют собой мелкие агрегаты кристаллического или аморфного строения с огромной удельной поверхностью, обладающей весьма значительной поверхностной энергией, а следовательно, и высокой адсорбционной емкостью. Это обстоятельство имеет большое значение, поскольку коагулирование связано с адсорбцией на коллоидных частицах примесей, содержащихся в воде.

Образованию коллоидных частиц предшествует формирование твердой фазы (ядра). На границе раздела фаз возникает двойной электрический слой, представляющий собой тонкий поверхностный слой из пространственно разделенных электрических зарядов противоположного знака.

В дисперсных системах двойной электрический слой образуют ионы и дипольные молекулы. Ионный двойной электрический слой возникает либо в результате диссоциации ионогенных групп вещества твердой фазы, либо вследствие избирательной адсорбции ионов, идентичных ионам, образующим кристаллическую решетку твердой фазы, либо сходных с ними. При этом сильнее адсорбируются ионы, которые значительно понижают свободную энергию поверхности твердой фазы.

В результате на границе между твердой фазой и раствором возникает подобие конденсатора, внутренняя обкладка которого образована потенциалопределяющими ионами, а наружная — противоионами —

присутствующими в воде ионами противоположного знака. Противоионы группируются у поверхности ядра вследствие электрического притяжения между разноименными электрическими зарядами, образуя коллоидную частицу.

Из-за теплового движения ионов в воде и их отрыва слой окружающих частиц противоионов приобретает диффузионный характер.

Коллоидная частица вместе с окружающим ее диффузионным слоем называется *мицеллой*.

Необходимым условием слипания частиц дисперсной фазы является их сближение, достаточное для проявления сил межмолекулярного притяжения. Для слипания коллоидных частиц необходимо преодолеть сопротивление так называемого «расклинивающего давления», обусловленного силами молекулярного сцепления воды с поверхностью частиц. На расстоянии 1 нм и меньше силы взаимного притяжения взаимодействующих частиц (рис. 2.3) превалируют над силами сцепления в гидратном слое. При значительных расстояниях между ними гидратные слои являются термодинамически устойчивым стабилизирующим фактором.



Рис. 2.3. Кривые взаимодействия частиц

При добавлении в очищаемую воду коагулянтов – противоположно заряженных коллоидов – происходит взаимная коагуляция двух систем.

На рис. 2.1 представлена схема строения мицеллы золя гидроксида алюминия. *Золь* – система, состоящая из коллоидных частиц, распределенных в жидкой или газообразной среде. Если такой средой является вода, система называется гидрозолем.

Коллоидная частица золя гидроксида алюминия состоит из ядра, образованного гидроксидом алюминия, адсорбционно связанных с ним потенциалообразующих водородных ионов и некоторого количества ионов хлора. Количество ионов хлора меньше, чем количество ионов водорода, в результате чего данная коллоидная частица имеет положительный заряд.

Ионы водорода, и входящие в состав частицы противоионы хлора образуют двойной электрический слой. Отдельные ионы хлора образуют диффузионный слой и вместе с коллоидной частицей составляют мицеллу золя гидроксида алюминия.

В зависимости от условий формирования золя потенциалообразующие ионы и противоионы могут меняться местами. Так, золь гидроксида алюминия, образующийся при гидролизе солей алюминия, заряжен положительно при низких значениях pH воды и отрицательно — при высоких.

Поверхность коллоидной частицы золя приобретает заряд в результате ряда процессов: в щелочной среде кристаллическая решетка частицы достраивается гидроксильными ионами, находящимися в воде, приобретая отрицательный заряд; в нейтральной и кислой средах – положительный заряд возникает за счет адсорбции решеткой ионов Al^{3+} .

Это связано с тем, что гидроксид алюминия является типичным амфотерным соединением, обладая как кислым, так и основными свойствами.

Амфотерность (двойственность свойств) гидроксидов и оксидов многих элементов проявляется в образовании ими двух рядов солей. Например, в одних реакциях $Al(OH)_3$ и Al_2O_3 проявляют свойства основных гидроксидов и

оксидов, то есть они подобно щелочам реагируют с кислотами и кислотными оксидами, образуя соль, в которой алюминий является катионом Al^{3+} . В других реакциях $Al(OH)_3$ и Al_2O_3 выполняют функцию кислотных гидроксидов и оксидов, образуя соль, в которой атом алюминия входит в состав аниона (кислотного остатка) AlO .

Сам элемент *алюминий* проявляет в этих соединениях свойства металла и неметалла. Следовательно, алюминий – *амфотерный элемент*. Подобные свойства имеют также элементы А-групп – Be, Ga, Ge, Sn, Pb, Sb, Bi, Po и другие, а также большинство элементов Б-групп – Cr, Mn, Fe, Zn, Cd и другие, что является условием избирательной адсорбции ионов этих элементов при формировании коллоидных частиц и дальнейшей очистке воды от них с помощью алюминийсодержащих коагулянтов.

Правильный выбор дозы коагулянта имеет первостепенное значение для коагулирования примесей воды. Под дозой коагулянта подразумевается определенное количество реагента, которое добавляется к единице объема обрабатываемой воды. Доза коагулянта измеряется в мг/л, г/м³.

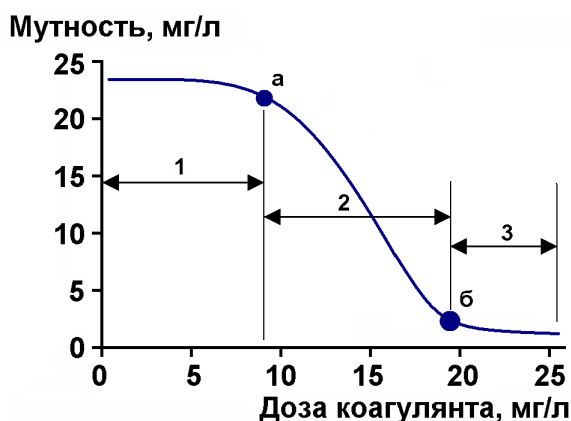


Рис. 2.4. Коагуляционная кривая:

а – порог коагуляции; б – оптимальная доза коагулянта

Наглядное представление о влиянии дозы коагулянта на процессы осветления и обесцвечивания воды дает коагуляционная кривая (рис. 2.4). Ее можно разбить на три зоны. В первой зоне при малых дозах коагулянта эффект

осветления и обесцвечивания воды отстаиванием или фильтрованием незначителен. Во второй зоне увеличение дозы коагулянта резко сказывается на эффекте осветления и обесцвечивания воды. Граница между первой и второй зонами носит название порога коагуляции. В третьей зоне увеличение дозы коагулянта не дает заметного улучшения эффекта осветления и обесцвечивания воды. Кривая практически параллельна оси абсцисс. Граница между второй и третьей зонами носит название оптимальной дозы.

Анализ коагуляционной кривой позволяет убедиться в том, какое огромное значение оказывает доза коагулянта на процессы осветления и обесцвечивания воды. Все характерные точки коагуляционной кривой (порог коагуляции, оптимальная доза, размеры зон) зависят от качества и свойств исходной воды. Не существует единой коагуляционной кривой, однако их характер одинаков.

Применение коагулянтов, в состав которых входят гидроксихлориды алюминия различной степени основности, даёт следующие преимущества:

- ускорение хлопьеобразования;
- поддержание концентрации остаточного алюминия в очищенной воде в пределах, требуемых ГОСТ;
- проведение эффективной коагуляции при низких температурах;
- расширение рабочего диапазона по pH и щелочному резерву;
- отсутствие жестких требований по дозировке в связи с низким порогом коагуляции;
- высокая прочность хлопьев, увеличивающая эффективность фильтрации и чёткость границы осветлённой зоны при отстаивании.

Влияние температуры воды на процесс коагуляции ее примесей. Молекулы воды, а также частицы ее примесей находятся в тепловом броуновском движении, интенсивность которого прямо пропорциональна температуре воды. Процесс коагуляции во времени делится на две фазы: перекинетическую и ортокинетическую. Первая фаза весьма непродолжительна и заключается в том, что после введения коагулянта и нарушения агрегативной устойчивости

частиц примесей в результате обменной адсорбции ионов наступает процесс их агломерации при контактировании. Очевидно, что вероятность соударения отдельных частиц между собой и их последующая агломерация зависят от скорости взаимного перемещения от теплового броуновского движения. Перекинетическая фаза процесса коагулирования примесей воды заканчивается образованием первичных агрегатов, для дальнейшего передвижения которых энергии теплового броуновского движения уже недостаточно.

Вторая фаза коагуляции ортокинетическая, в отличие от первой протекает значительно дольше (до 60 мин. и более) и заключается в слипании и формировании крупных плотных хлопьев, что обеспечивается созданием оптимальных условий для дальнейшего укрупнения первичных агрегатов путем перемешивания обрабатываемой воды в специальных сооружениях - камерах хлопьеобразования, в результате которого происходит контактирование первичных мелких агрегатов. На этот процесс существенное влияние оказывают условия перемешивания. С одной стороны, интенсивность перемешивания должна обеспечивать максимально возможное контактирование отдельных агрегатов между собой, а с другой - она не должна вызывать разрушение образующихся хлопьев.

Большое влияние на процесс оказывает содержания в воде естественных взвесей. Грубодисперсные примеси являются как бы «центрами коагуляции», способствуя формированию более крупных и плотных хлопьев, которые быстро осаждаются или легко извлекаются из воды при фильтровании.

Процесс коагуляции может быть значительно ускорен при использовании флокулянтов. *Флокулянтами* в технологии очистки воды называют высокомолекулярные вещества, интенсифицирующие процесс хлопьеобразования гидроксидов алюминия или железа (III), а также работу отдельных водоочистных сооружений. Они принадлежат к классу линейных полимеров, для которых характерна цепочечная форма макромолекул. Молекулярная масса флокулянтов колеблется в пределах от десятков тысяч до

нескольких миллионов; длина цепочки, состоящей из ряда одинаковых звеньев, составляет сотни нанометров. Они хорошо растворимы в воде. Их водные растворы являются истинными растворами, т.е. гомогенными однофазными термодинамически устойчивыми системами.

Высокомолекулярные флокулянты классифицируют на органические (природные и синтетические) и неорганические, на анионного и катионного типа. В качестве флокулянтов из природных веществ используют крахмал, водорослевую крупку, белковые гидролизные дрожжи, картофельную мезгу, альгинат натрия и др. Из синтетических анионных флокулянтов наиболее широко применяют органический полимер полиакриламид (ПАА), затем флокулянты серии К (К-4, К-6 и др.). Организовано также производство флокулянтов катионного типа (ВА-2, ВА-3, ВА-102, ВПК-101, ВПК-402, КФ, УКФ, ВАФ), которые в отличие от ПАА вызывают образование крупных хлопьев без предварительной обработки примесей воды коагулянтами.

Применение флокулянтов при обработке воды позволяет ускорить в камерах хлопьеобразования и отстойниках формирование хлопьев и их декантацию, повысить эффект осветления воды и увеличить скорость ее движения в сооружения. В осветлителях со взвешенным осадком они увеличивают концентрацию частиц во взвешенном слое и уменьшают их вынос из него при одновременном повышении скорости восходящего потока воды. Использование флокулянтов на действующих очистных сооружениях позволяет увеличивать их производительность и водоочистного комплекса в целом. В отдельные периоды года (паводки, низкие температуры воды, и др.), когда технологические сооружения обеспечивают получение воды стандартного качества лишь при пониженной производительности, использование флокулянтов позволяет сохранять требуемую подачу воды.

Предварительная обработка воды окислителями также повышает эффективность коагуляции. Это объясняется тем, что окислители разрушают гидрофильные органические соединения, стабилизирующие дисперсные

примеси воды, и облегчают условия протекания коагуляции. Особенно эффективно применение окислителей при обработке маломутных цветных вод.

При этом возрастает гидравлическая крупность хлопьев коагулированной взвеси и интенсифицируется осветление воды.

Уменьшение времени хлопьеобразования при низкой температуре воды и снижение дозы коагулянта могут быть достигнуты введением замутнителей. При замутнении воды большую роль играет степень дисперсности вводимых частиц. Существенно (на 30...60%) ускоряется процесс хлопьеобразования при добавлении частиц размером меньше 3 мкм. Рекомендуется вводить в воду высокодисперсную глинистую взвесь в количестве 10 мг/л или скоагулированный осадок в количестве 0,4...0,6 от дозы коагулянта. При низких температурах и малой мутности воды резко ухудшаются технологические процессы ее очистки, поэтому использование замутнителя, в роли которого могут выступать промывных вод скорых фильтров и осадков отстойников и осветлителей, особенно важно.

Эффективное воздействие осадка объясняется тем, что он представляет собой уже готовые крупные частицы такого же строения, что и выделяющийся гидроксид. Поэтому время, необходимое для образования сверхмицеллярных агрегатов, сокращается. Таким образом, ускоряется хлопьеобразование, образуются более крупные хлопья, быстрее идет их декантация, а, следовательно, интенсивнее осветляется вода. Для достижения высокого эффекта осветления рециркулируемый осадок следует вводить в воду за 15...30 с до введения коагулянта. Осадок рекомендуется применять при pH исходной воды не ниже 7,0. Возраст осадка не должен превышать двух суток с отбором его из шламоотводящих труб горизонтальных отстойников.

Коагуляция примесей воды может быть значительно ускорена ее обработкой смесью коагулянтов. Действие коагулянтов при этом обоюдно усиливается. Такое явление наблюдается при использовании смеси $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ и FeCl_3 в соотношении 1:1, 1:2, 2:1 или этих же коагулянтов с силикатом натрия.

Подобное улучшение коагуляции достигается обработкой воды смесью неочищенного и очищенного глинозема в соотношении 3:1 или смесью коагулянтов глинозема и хлорного железа в соотношениях 3:1 и 4:1. В ряде случаев вместо сернокислого алюминия для обработки воды используют оксихлорид алюминия. Опыт применения этого коагулянта показал хорошие результаты на ряде водоочистных комплексов.

К физическим методам интенсификации процесса коагуляции относятся аэрирование, наложение электрического и магнитного полей, воздействие ультразвуком, ионизирующее излучение. Введение сжатого диспергированного воздуха в обрабатываемую воду в смеситель после добавления коагулянта с некоторым разрывом во времени позволяет удалить из зоны коагуляции образующийся при распаде угольной кислоты диоксид углерода. Своевременное удаление свободной углекислоты из сферы формирования микрохлопьев значительно ускоряет дальнейший ход коагуляции. Аэрирование в количестве 10...30% от расхода обрабатываемой воды позволяет снизить расход коагулянта на 25...30% и улучшить качество обработки воды.

2.1.3. Электрокоагуляция. Теоретические основы. Аппаратное оформление процесса

Для осуществления процесса коагуляции в воду могут быть введены вместо коагулянтов ионы тяжелых металлов, полученные электрохимическим путем. Для этого воду пропускают через электролизер - аппарат с опущенными в него электродами - анода (из алюминия или железа) и катода. Питание электролизера осуществляется от постоянного или переменного источника тока. При применении растворимых металлических электродов электродный процесс сопровождается рядом электрохимических явлений и реакций. Их скорость по законам электрохимической кинетики определяется общим значением потенциала на границе металл-раствор, составом воды и условиями

диффузии в ней компонентов или продуктов реакции. В процессе электролиза на электродах восстанавливаются или окисляются компоненты электролита. В переносе тока принимают участие все находящиеся в воде ионы, а также имеющие заряд коллоидные и взвешенные частицы.

В основном перенос электричества в природных водах осуществляют катионы Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ и анионы SO_4^{2-} , HCO_3^- и Cl^- , а также ионы H^+ и OH^- , всегда содержащиеся в воде.

Количество металла m , перешедшего из анода в воду в результате электролиза, определяют из выражения

$$m = \eta \cdot A \cdot I \cdot t / (nF), \quad (2.1)$$

где A – атомная масса металла; F – число Фарадея (96500 Кл); I – сила тока, А; t – время прохождения тока, с; η – коэффициент выхода металла по току, %; n – валентность металла.

Растворение 1 г металлического алюминия эквивалентно введению в воду 12,3 г $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, растворение 1 г металлического железа – введению 4,8 г $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ или 4,9 г $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$.

Большинство аппаратов для очистки воды электрокоагуляцией представляет собой безнапорные пластинчатые электролизеры горизонтального или вертикального типа. Пластины или кольца металла располагают вертикально на расстоянии 3...20 мм одна от другой и удерживаются изолирующими вставками, электрический ток подводится к каждой пластине (рис. 2.5, 2.6). Для упрощения монтажа электрокоагуляторов и уменьшения потребляемой силы тока применяют биполярное подключение электродов, т.е. подвод тока не к каждой пластине, а через несколько пластин. Промежуточные пластины растворяются вследствие поляризации в возникающем электрическом поле.

Метод электрокоагуляции обеспечивает высокий эффект удаления из воды загрязнений в виде взвесей (минерального, органического и биологического

происхождения) коллоидов (соединений железа, веществ, обуславливающих цветность воды и т.д.), а также отдельных веществ, находящихся в молекулярном и ионном состояниях. Существенным преимуществом электрокоагуляции перед реагентными методами очистки воды является возможность отказа от строительства громоздких очистных сооружений, занимающих значительные производственные площади. Эксплуатация установок может быть значительно упрощена вследствие того, что электрохимические процессы легко поддаются механизации, управлению и автоматизации.

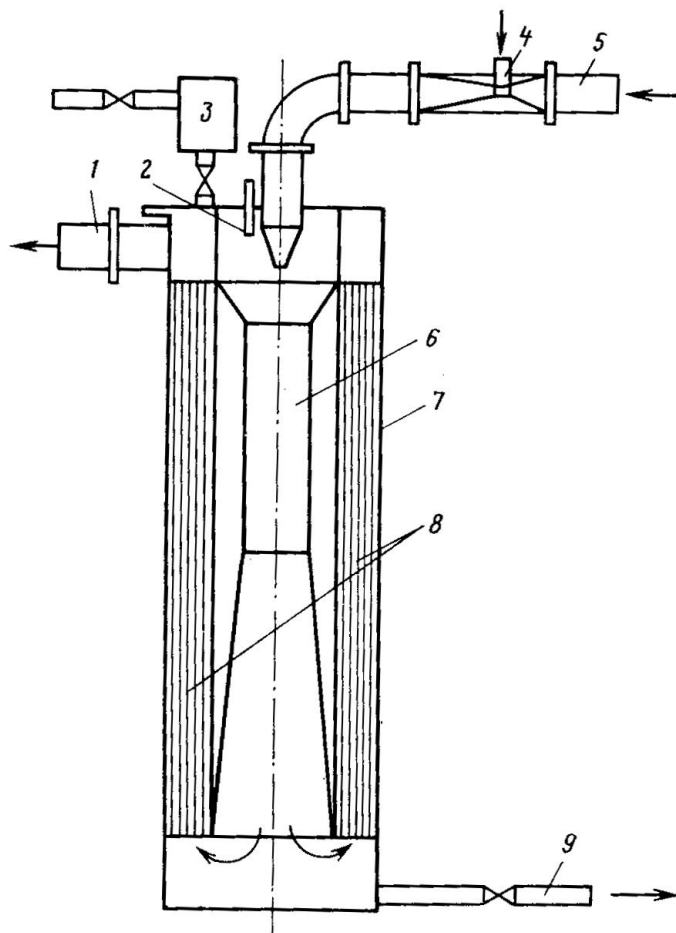


Рис. 2.5. Электрокоагулятор системы Е.Ф. Кургаява:

1 к 5 - отвод и подача обрабатываемой воды; 2 - отражатель; 3 - реагент; 4 - всас воздуха; 6 - диффузор; 7 - корпус; 8 - электроды; 9 - слив

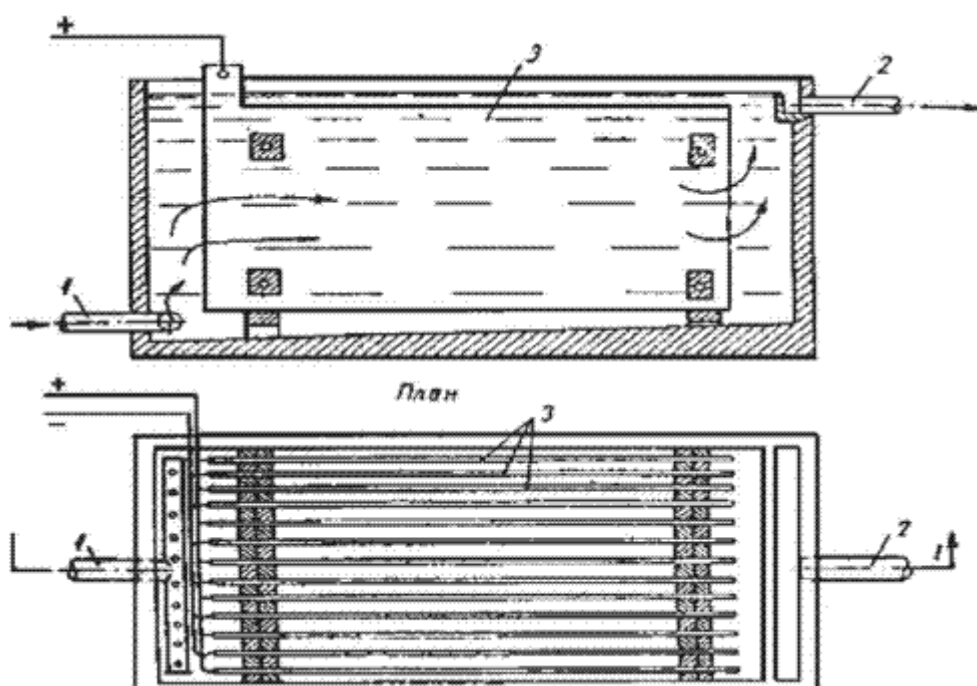


Рис. 2.6. Электрокоагулятор:

1 – подача исходной воды; 2 – отвод воды из электролизера; 3 – пластины алюминия или железа

Электрокоагуляция позволяет осуществлять процесс очистки воды в компактных, автоматически действующих и легко обслуживаемых установках и особенно удобна для небольших автономных объектов (на судах речного флота, в сельском хозяйстве, для малых поселков и т.д.).

К числу недостатков метода следует отнести повышение расхода электроэнергии и металла на единицу обрабатываемой воды.

2.2. Реагенты, используемые в технологии улучшения качества воды

2.2.1. Характеристики реагентов

В водоподготовке применяют следующие коагулянты на основе алюминия: сульфат алюминия, оксихлорид алюминия, алюминат натрия (табл. 2.1).

Сульфат алюминия $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ - неочищенный технический продукт, представляющий собой куски серовато-зеленоватого цвета, получаемые путем

обработки бокситов, нефелинов или глин серной кислотой. Он должен иметь не менее 9% Al_2O_3 , что соответствует содержанию порядка 30% чистого сульфата алюминия. В нем также содержится около 30% нерастворимых примесей и до 35% воды.



Рис. 2.7. Сульфат алюминия

Таблица 2.1

Характеристики коагулянтов

Коагулянт	Формула, сорт, марка	Содержание, % по массе	
		Al_2O_3	нерастворимых примесей
Сульфат алюминия: неочищенный	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	> 9	< 30
Сульфат алюминия: очищенный (по ГОСТ 12966-85)	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 16H_2O$ высший сорт	≥ 16	$\leq 0,3$
	1 сорт	≥ 16	$\leq 0,3$
	2 сорт	≥ 15	$\leq 0,7$
Оксихлорид алюминия (по ТУ 2163-001-63114035-2009)	$Al_2(OH)_5Cl$ Марка А	9-12	Хлорид-ионы: ≤ 23
	Марка Б	18-22	≤ 8
Оксихлорид алюминия (Аква-Аурат)	Аква-Аурат TM 30	$30 \pm 3,0$	Хлорид-ионы: $35,0 \pm 5,0$
	Аква-Аурат TM 10	$10,0 \pm 0,6$	$13,0 \pm 2,0$

	Аква-Аурат™14	13,6 ± 0,5	22,0 ± 2,0
	Аква-Аурат™18	17,0 ± 0,5	21,0 ± 2,0
Алюминат натрия	NaAlO ₂	45...55	6...8

Очищенный сульфат алюминия (ГОСТ 12966-85*) получают в виде плит серовато-перламутрового цвета из неочищенного продукта или из глинозема растворением в серной кислоте. Он должен иметь не менее 13,5% Al₂O₃, что соответствует содержанию 45% сульфата алюминия. Оба рассмотренных коагулянта перевозят навалом в закрытых железнодорожных вагонах.

В России для обработки воды выпускается также 23-25%-ный раствор сульфата алюминия. При его применении отпадает необходимость в специальном оборудовании для растворения коагулянта, а также упрощаются и удешевляются погрузочно-разгрузочные работы и транспортирование.

Глинозем имеет повышенную чувствительность к рН и температуре обрабатываемой воды. Изoeлектрическая область для гидроксида алюминия, где у него наименьшая растворимость, соответствует рН = 6,5...7,5. При более низких значениях рН образуются частично растворимые основные соли, при более высоких - алюминаты. При температуре исходной воды ниже 4°С в результате возрастания гидратации гидроксида алюминия замедляются процессы коагулирования ее примесей и декантации хлопьев, быстро засоряются фильтры, осадок гидроксида алюминия отлагается в трубах, остаточный алюминий попадает в фильтрат, а хлопья гидроксида образуются в воде уже после подачи потребителям.

Полиоксихлорид алюминия (ПОХА) выпускается в виде раствора или кристаллической формы в зависимости от концентрации основного вещества в пересчете на Al₂O₃ (от 7,0 до 33,0 %). Продукт может представлять собой как бесцветные или с желтоватым оттенком водные растворы (допускается опалесценция) так и порошок, гранулы, чешуйки от белого до кремового или желтого цвета.



Рис. 2.8. Оксихлорид алюминия в сухом виде

В общем виде брутто-формула полиоксихлорида алюминия $\text{Al}_a(\text{OH})_b\text{Cl}_c(\text{SO}_4)_d \cdot n\text{H}_2\text{O}$, где a , b , c , d , n – индексы, значения которых изменяются в следующих пределах: $a = (0,2-0,26)$; $b = (0,2-2,2)$; $c = (0,2-2,2)$; $d = (0-1,3)$; $n = (2-4)$. На практике часто используется формула $\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}$, этот реагент еще называют *алюминия хлоргидрат*. Отношение содержания OH^- к Al^{3+} в процентном выражении называется основностью. Вопрос основности и выбора марки ПОХА должен решаться применительно к конкретным характеристикам очищаемой воды, так как высокоосновные реагенты более дорогие, а оптимальными по затратам и коагулирующей способности часто оказываются среднеосновные и даже низкоосновные оксихлориды алюминия.

Обычно оксихлорид алюминия (ОХА) получается обработкой металлического алюминия соляной кислотой, или его растворением в растворе хлорида алюминия при $90\text{ }^\circ\text{C}$.

При применении полиоксихлорида алюминия минерализация воды возрастает, а ее щелочность снижается в меньшей степени, чем при введении сульфата алюминия, что особенно важно при обработке мягких вод.

Полиоксихлорид алюминия в определенных условиях оказывается эффективнее сульфата алюминия, так, например, при низких температурах обрабатываемой воды, при обработке цветной воды. Полиоксихлорид

алюминия позволяет получить питьевую воду с содержанием остаточного алюминия в пределах 0,05-0,10 мг/л.

По ТУ 2163-001-63114035-2009 оксихлорид алюминия может выпускаться марки А и Б. В табл. 2.1 приведены их физико-химические характеристики.

Московским заводом Аурат (химический завод им. П.Л. Войкова) выпускается оксихлорид алюминия в твердом виде (кристаллический порошок), концентрация основного вещества в пересчете на Al_2O_3 составляет 35 %. Для приготовления водного 10%-го раствора 40,1 г Аква-АуратаTM30 необходимо растворить в 81,6 см³ воды. Коагулянт поставляется в полипропиленовых мешках, биг-бэгах (с полиэтиленовыми вкладышами).

Завод Аурат выпускает оксихлорид алюминия в виде растворов трех концентраций с различным отношением Al/Cl: Аква-АуратTM10, Аква-АуратTM14, Аква-АуратTM18 (табл. 2.1). Жидкий коагулянт поставляется в железнодорожных цистернах для перевозки соляной кислоты, автоцистернах, полиэтиленовых бочках, контейнерах. Плотность растворов составляет 1,24 – 1,36 г/см³, pH – 2,5 (Аква-АуратTM10), 0,7 (Аква-АуратTM14), 1,0 (Аква-АуратTM18). Раствор ОХА допускает замораживание и оттаивание.

Также Аурат выпускает коагулянт алюминия хлоргидрат, который представляет собой раствор от бесцветного до светло-серого или желтого цвета с массовой долей хлоргидрата алюминия в пересчете на Al_2O_3 от 16,5 до 24 %.

Алюминат натрия $NaAlO_2$ представляет собой твердые куски белого цвета с перламутровым блеском на изломе, получаемые растворением гидроксида или оксида алюминия в растворе гидроксида натрия. Сухой товарный продукт содержит 55% AlO_3 , 35% Na_2O и до 5% свободной щелочи $NaOH$. Растворимость $NaAlO_2$ - 370 г/л (при 20°C). Насыпная масса 1,2...1,8 т/м³.

В водообработке применяют также железосодержащие коагулянты: хлорное железо, сульфаты железа (II) и железа (III), хлорированный железный купорос.

Хлорное железо $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (ГОСТ 11159-86) представляет собой темные с металлическим блеском кристаллы, очень гигроскопичные, поэтому транспортируют его в железных герметичных бочках. Получают безводное хлорное железо хлорированием стальной стружки при температуре 700°C , а также как побочный продукт при производстве хлоридов металлов горячим хлорированием руд. Содержит в товарном продукте не менее 98% FeCl_3 . Плотность $1,5 \text{ т/м}^3$.

Сульфат закиси железа $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (железный купорос по ГОСТ 6981-85) представляет собой прозрачные зеленовато-голубые кристаллы, легко буреющие на воздухе в результате окисления железа (II). Товарный продукт выпускается двух марок (А и Б), содержащих соответственно не менее 53 и 47% FeSO_4 , не более 0,25 и 1% свободной H_2SO_4 и не более 0,4 и 1% нерастворимого осадка. Поставляют его в деревянных бочках или барабанах массой до 120 кг, а также в ящиках массой 80 кг, плотность $1,5 \text{ т/м}^3$. Промышленность выпускает также и 30%-ный раствор сульфата железа(II), содержащий до 2%, свободной H_2SO_4 . Транспортируют его в гумированной таре.

Окисление гидроксида железа (II), образующегося при гидролизе железного купороса при pH воды менее 8, протекает медленно, что приводит к неполному его осаждению и неудовлетворительному коагулированию. Поэтому перед вводом железного купороса в воду добавляют известь или хлор либо оба реагента вместе, усложняя и удорожая тем самым водообработку. В связи с этим железный купорос используют главным образом в технологии известкового и известково-содового умягчения воды, когда при устранении магниевой жесткости значение pH поддерживают в пределах 10,2... 13,2 и, следовательно, соли алюминия не применимы.

Сульфат железа (III) $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (сульфат железа окисный по ВТУ УХКП52-86) получают растворением оксида железа в серной кислоте. Продукт кристаллический, очень гигроскопичный, хорошо растворяется в воде. Поставляется в бумажных мешках, плотность $1,5 \text{ т/м}^3$. Использование солей

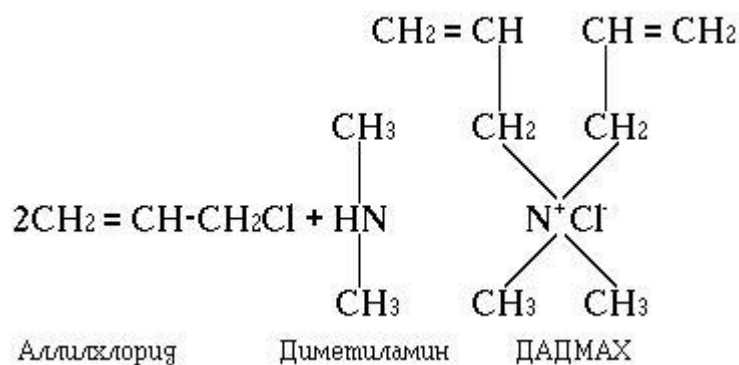
железа (III) в качестве коагулянта предпочтительнее по сравнению с сульфатом алюминия. При их применении улучшается коагуляция при низких температурах воды, на процесс мало влияет pH среды, ускоряется декантация скоагулированных примесей и уменьшается время отстаивания (плотность хлопьев гидроксида железа (III) в 1,5 раза больше, чем гидроксида алюминия). К числу недостатков солей железа (III) относится необходимость их точной дозировки, так как ее нарушение приводит к проникновению железа в фильтрат. Хлопья гидроксида железа (III) осаждаются неравномерно, в связи, с чем в воде остается большое количество мелких хлопьев, поступающих на фильтры. Эти недостатки в значительной мере устраняются при добавлении сульфата алюминия.

Хлорированный железный купорос $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3 + \text{FeCl}_3$ получают непосредственно на водоочистных комплексах обработкой раствора железного купороса хлором, вводя на 1 г $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0,160...0,220 г хлора.

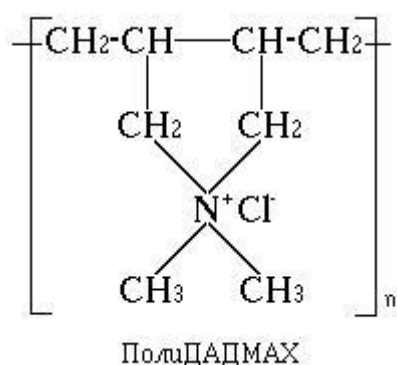
Титановый коагулянт представляет собой сложную композицию на основе соединений титана и алюминия (титана диоксида, алюминия трихлорида гексагидрата, алюминия хлорида гидроксида, алюминия гидроксида). Массовое содержание оксида титана составляет, % – 15 ± 5 , оксида алюминия, % – 40 ± 10 . Сухой титановый коагулянт представляет собой мелкодисперсный порошок белого или от светло-желтого до светло-серого цвета с низкой объемной плотностью, гигроскопичный. Особенности титановых коагулянтов, заявляемые производителями, заключаются в высокой коагулирующей способности, работе в широком диапазоне pH, отсутствии необходимости подщелачивания воды, эффективной работе при низкой температуре воды, эффективном удалении коллоидных примесей, растворенных органических веществ, ионов тяжелых металлов, микроорганизмов.

Флокулянт-полиэлектролит водорастворимый катионный серии полиДАДМАХ (синоним: полидиаллилдиметиламмоний хлорид) представляет собой высокомолекулярный сильноосновной катионный полимер линейно-

циклической структуры. Реагент полиДАДМАХ синтезируется из аллилхлорида и диметиламина нагреванием в щелочной среде с получением мономера диметилдиаллил-аммонийхлорида (ДАДМАХ):



Полимеризация происходит циклическим путем с образованием следующей структуры:



Эмпирическая формула $-(\text{C}_8\text{H}_{16}\text{NCl})_n-$. Реагент может быть представлен в виде порошка или в жидкой форме с концентрацией активного вещества от 10 до 40 масс. %. Катионный заряд расположен на боковой цепи. Молекулярная масса от 10 тыс. до 1 млн. Вязкость 40%-ного раствора от 40 до 20000 сПз.

ПолиДАДМАХи производят под различными торговыми наименованиями более 260 компаний мира. В частности, SNF Floerger (Флопам серии ФЛ 45), Cytec Industries B.V. (Суперфлок С 591, 592, 597), Nalco (Налколайт 8102, 8103),

Stockhausen (Праестол 186-189) и т.д. В России аналогичные катионные реагенты выпускаются под маркой ВПК-402.

Полиэлектролит ВПК-402 выпускается в модификациях для очистки питьевой воды и для промышленных нужд и используется в качестве флокулянта и коагулянта для широкого спектра задач по очистке природных и сточных вод. Данный реагент допущен к применению при подготовке питьевой воды, что существенно отличает его от аналогов другого химического состава. Полиэлектролит ВПК-402 может применяться как самостоятельно, так и в совокупности с коагулянтами. Полиэлектролит ВПК-402 не горюч, не взрывоопасен, малотоксичен. По степени воздействия на организм полиэлектролит ВПК-402 относится к 4-ому классу опасности (вещества малоопасные). Поставляется в полиэтиленовых бочках и ж/д цистернами.

В последнее время производители стали выпускать смеси коагулянтов и флокулянтов с различными добавками. Так, например, заводом Аурат выпускаются следующие марки коагулянтов:

- полиоксихлориды алюминия, зарегистрированные под торговыми марками АКВА-АУРАТ™ 10М, АКВА-АУРАТ™ 13М и другими, содержат сульфат алюминия и флокулянт полидиаллилдиметиламмоний хлорид (ПолиДАДМАХ);

- коагулянт «УНИКО-СА» – композиция на основе алюминия сульфата, полигексаметиленгуанидина гидрохлорида (ПГМГ-ГХ) и алкилдиметилбензиламмоний хлорида. Товарная форма продукта – жидкая или твердая в зависимости от содержания основного вещества;

- композиционные коагулянты «УНИКО-ОХА10» и «УНИКО-ОХА18» – композиция на основе полиоксихлорида алюминия, полигексаметиленгуанидин гидрохлорида и алкилметилбензиламмоний хлорида.

Разработка новых синтетических коагулянтов и флокулянтов привела к необходимости нормативного регулирования их применения в питьевом водоснабжении. В частности, введены МУ 2.1.4.1060-01 «Санитарно-

эпидемиологический надзор за использованием синтетических полиэлектролитов в практике питьевого водоснабжения». Там указывается, что в практике очистки питьевой воды используются реагенты, подавляющее большинство которых относится к следующим четырем группам соединений:

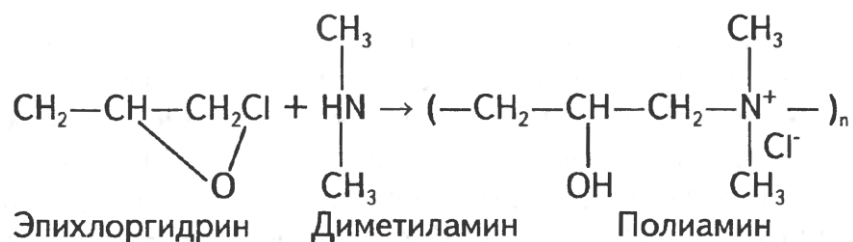
- полиамины (полиэпихлоргидриндиметиламины, полиЭПИ-ДМА);
- полидиаллилдиметиламмоний хлориды (полиДАДМАХи);
- полиакриламиды (ПАА);
- смеси (сополимеры).

Полиамины и полиДАДМАХи характеризуются очень высоким катионным зарядом при относительно невысокой молекулярной массе, что определяет их использование в качестве коагулянтов при очистке питьевой воды. Полиамины отличаются от других полиэлектролитов тем, что их катионный заряд располагается на главной молекулярной цепи. Полиакриламиды представлены в неионной, анионной и катионной форме, имеют молекулярную массу от 1 до 20 млн. и применяются в качестве флокулянтов.

Органические коагулянты представляют собой катионные полиэлектролиты, которые ведут себя как первичные (неорганические) коагулянты. Но если действие неорганических коагулянтов основано на дестабилизации путем сжатия двойного электрического поля, окружающего частицы, то органические коагулянты осуществляют дестабилизацию за счет абсорбции длинных молекулярных цепочек с последующим образованием мостиков между частицами и молекулами полимера. Органические коагулянты в отличие от флокулянтов являются низкомолекулярными водорастворимыми полимерами с молекулярной массой 10000-300000.

Эпихлоргидрин-диметиламин (ЭПИ-ДМА) является общепринятым названием полимеров на основе полиамина, получаемых путем реакции конденсации диметиламина и эпихлоргидрина. За счет управления последовательностью добавления мономера в реактор молекулярная масса получаемого полимера может меняться в пределах от 10000 до 1000000.

Удельный катионный заряд и связывающая способность этих коагулянтов определяется именно действием аминов.



Эмпирическая формула $(\text{C}_a\text{H}_b\text{N}_c\text{O}_d\text{Cl}_e)_n$, а, b, c, d и e – переменные, определяемые используемыми реагентами и их молярным соотношением. Реагент представляет собой водный раствор в форме вязкой жидкости, с содержанием активного вещества от 30 до 50%. Продукт смешивается с водой при любых концентрациях (пропорциях). Молекулярная масса от 10 тыс. до 1 млн. Катионный заряд расположен на главной цепи. Вязкость 50%-ного раствора от 40 до 20000 сПз.

В практике водоподготовки используется множество различных флокулянтов – как для основного процесса очистки воды, так и для обработки промывных вод и осадка.

Активная кремниевая кислота (АК) представляет собой коллоидный водный раствор кремниевых кислот их труднорастворимых солей, получаемых частичной или полной нейтрализацией щелочности силиката натрия (жидкого стекла) при воздействии активатора (серная кислота, сульфат алюминия, хлор, гидрокарбонат или гидросульфат натрия и др.). Получаемые молекулы кремниевой кислоты выделяются из раствора в виде отрицательно заряженных коллоидных частиц. Механизм взаимодействия АК с агрегативно-неустойчивыми примесями воды, а также с гидроксидами алюминия и железа(III) объясняется взаимной коагуляцией разноименно заряженных частиц и ее действием на свойства сверхмицеллярных структур, образующихся при введении коагулянта.

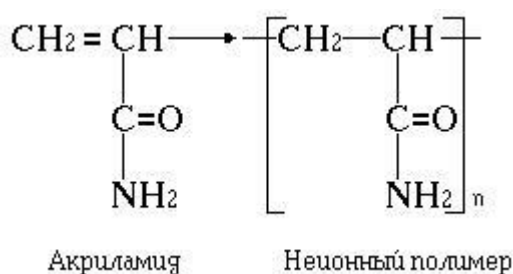
Растворы АК не выпускаются промышленностью, а готовятся на месте применения непосредственно перед использованием, т.е. они не относятся к

стандартным продуктам с определенными свойствами. В настоящее время АК практически не применяется на станциях водоподготовки.

Полиакриламид - белое аморфное, хорошо растворимое в воде вещество, содержащее ионогенные группы; при гидролизе образует акриловую кислоту и ее соли. Механизм действия ПАА основан на адсорбции его молекул на частицах примесей воды, гидроксидов алюминия или железа (III), образующегося при гидролизе солей-коагулянтов. Молекулы ПАА способны образовывать ассоциаты фибриллярных структур цепочки длиной 130 нм. Благодаря вытянутой форме молекулы адсорбция происходит в разных местах с несколькими частицами гидроксида, в результате чего последние связываются полимерными мостиками в тяжелые, крупные и прочные агрегаты (глобулы).

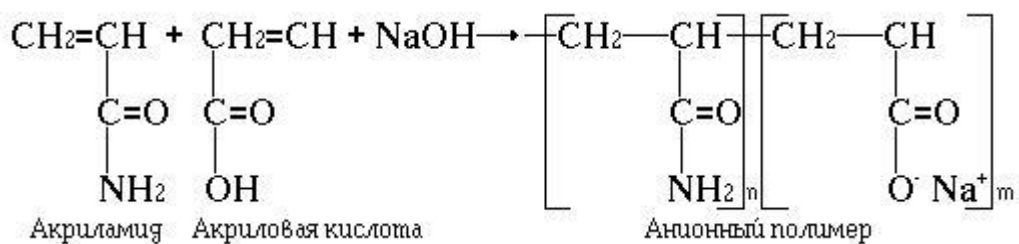
На основе полиакриламида выпускается множество марок флокулянтов, среди них различают неионные, анионные и катионные полиакриламиды.

Неионные ПАА. Представляют собой акриламидные гомополимеры, получаемые путем полимеризации мономера акриламида:



Эмпирическая формула: $-(\text{C}_3\text{H}_5\text{NO})_x-$, где: x – переменная в зависимости от продукта. Производится в виде гранул или порошка. Молекулярная масса 1-20 млн. Плотность заряда нулевая, т.е. полимер не имеет ни положительного, ни отрицательного электрического заряда.

Анионные ПАА. Эти флокулянты получают путем сополимеризации мономеров акриламида и акрилата натрия в различных пропорциях:

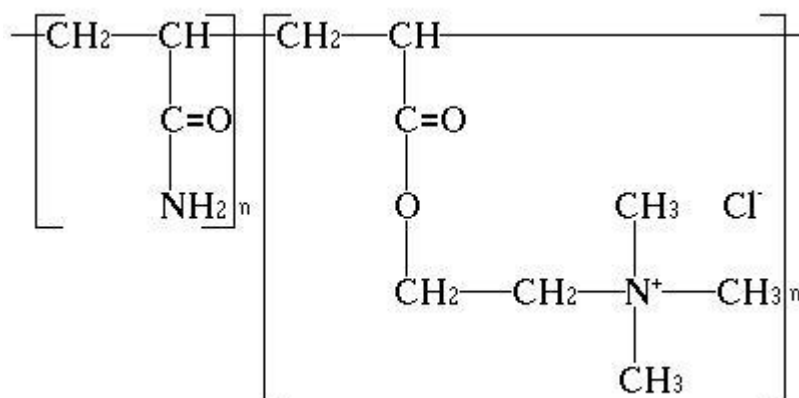


Эмпирическая формула: $-(\text{C}_3\text{H}_5\text{NO})_x$ с $-(\text{C}_3\text{H}_3\text{O}_2\text{K})_y$, где: К – положительный ион; x и y – переменные в зависимости от продукта. Производится в виде геля, гранул или порошка. Молекулярная масса 1-20 млн. Имеет отрицательный заряд с плотностью от 1 до 50%.

Катионные ПАА. Эти реагенты получают путем сополимеризации акриламида и катионного акрилового мономера. Наиболее часто для этой цели используются следующие катионные мономеры:

- (2-акриламидоэтил) N-метил, N-диэтиламмоний метилсульфат;
- (2-акриламидоэтил) N-метил, N-диэтиламмоний хлорид;
- (2-акриламидоэтил) триметиламмоний хлорид;
- (2-акриламидоэтил) триметиламмоний метилсульфат;
- (2-метакриламидоэтил) триметиламмоний хлорид;
- (2-метакриламидоэтил) триметиламмоний метилсульфат;
- (2-метакриламидпропил) триметиламмоний хлорид;
- (3-акриламидпропил) триметиламмоний метилсульфат.

Типичная структура катионного ПАА представлена ниже:



Эмпирическая формула: $-(C_3H_5NO)_x$ с $-(C_aH_bN_cO_dA)_y$, где: К – отрицательный ион; x и y – переменные в зависимости от катионного мономера. Производится в виде гранул или порошка. Молекулярная масса 3-15 млн. Имеет положительный заряд, плотность которого от >0 до $<15\%$.

На основе полиакриламида компанией Соленис (Solenis) выпускается целая линейка флокулянтов марки Праестол (Praestol), получивших широкое распространение за рубежом и в России. Производство флокулянтов расположено в г. Пермь (Россия) и в г.Крефельд (Германия).

Для очистки питьевой воды применяют марки, содержащие аббревиатуру TR. Анионные флокулянты представлены марками: Праестол 2515 TR, Праестол 2530 TR, Праестол 2540 TR и другими, катионные – марками Праестол 610 TR, Праестол 611 TR, Праестол 650 TR, Праестол 851 TR и другими. Неионогенные флокулянты Праестол представлены технически чистыми полиакриламидами. Внешне флокулянт Праестол представляет собой белые гранулы.

Флокулянт ВА-2 (поли-4-винил-М-бензилтриметиламмоний-хлорид) представляет собой порошкообразный или 7...15%-ный подвижный раствор полиэлектролита (молекулярная масса $(5...10) \cdot 10^{-4}$). Механизм действия ВА-2 заключается в том, что, имея положительный заряд, его макроионы адсорбируются на отрицательно заряженных коллоидно-дисперсных примесях воды, образуя крупные агрегаты. Поэтому при применении флокулянтов катионного типа хлопьеобразование происходит без обычных минеральных коагулянтов. Присутствующие в природных водах высокомолекулярные гуминовые кислоты формируют с ВА-2 нерастворимые агрегаты. Фенольные и гидроксильные группы гуминовых кислот, взаимодействуя с основными группами флокулянта, образуют малодиссоциированные соли.

При обработке маломутных цветных вод флокулянт ВА-2 образование крупных хлопьев, однако, не происходит даже в оптимальных условиях

перемешивания. Эффективное отделение хлопьев может быть достигнуто только путем фильтрования. Поэтому при очистке маломутных цветных вод ВА-2 следует применять только в одноступенных схемах с контактными осветлителями или крупнозернистыми фильтрами. Расход флокулянта при этом составляет 1 мг/л на 7-10 град. цветности, что экономически не выгодно.

В отличие от минеральных коагулянтов ВА-2 не увеличивает содержания взвешенных веществ, не повышает солесодержание воды, не изменяет ее pH и не усиливает коррозионных свойств воды. Это обстоятельство является одним из важнейших преимуществ катионных полимеров. Кроме того, замена коагулянта на ВА-2 сокращает объемы складских помещений и значительно упрощает эксплуатацию реагентного хозяйства. Применение ВА-2 наиболее эффективно при обработке мутных вод. Предварительные технико-экономические расчеты показали, что применение ВА-2 в дозах до 1,5 мг/л является более выгодным, чем обработка воды сернокислым алюминием. Содержание ВА-2 в очищенной воде, исходя из санитарно-токсикологических исследований, не должно превышать 0,5 мг/л.

Для обработки воды применяется известь строительная воздушная. Различают следующие *виды строительной извести*, которые могут употребляться для данной цели: *известь негашеная комовая (кипелка); известь гидратная – пушонка; известь негашеная молотая.*

В зависимости от содержания оксида кальция и оксида магния известь разделяется на два вида: *известь кальциевую*, содержащую не более 7% MgO и *известь магниевую*, содержащую более 7% MgO. Поскольку оксид магния не вступает в реакцию и является в данном случае балластом, желательно употреблять кальциевую известь.

В зависимости от скорости гашения *известь разделяется на быстро гасящуюся* (скорость гашения до 10 мин.); *среднегасящуюся* (скорость гашения от 10 до 30 мин.); *медленно гасящуюся* (скорость гашения свыше 30 мин.). В данном случае желательна первая.



Рис. 2.9. Известь негашеная комовая

Известь негашеная комовая перевозится навалом. Известь молотая и гидратная (пушонка) перевозятся в таре или специально приспособленным автотранспортом. При хранении и перевозке извести должны быть приняты меры, предохраняющие ее от увлажнения, масса 1 м³ гашеной извести 1,0 т, негашеной 0,6-0,7 т. При небольших расходах извести желательно превращать ее вне установки (на складе) в известковое тесто, доставлять в таком виде на установку, где разбавлять до степени известкового молока.

2.2.2. Выбор доз реагентов

Доза коагулянта для вод разного состава не одинакова и устанавливается путем пробного коагулирования исходной воды в лаборатории. Оптимальная доза коагулянта вызывает образование крупных, быстро декантирующих хлопьев и не дает опалесценции воды. Существует методика определения *показателя коагулируемости воды*, под которым понимается способность к коагуляции грубодисперсных и коллоидных примесей, присутствующих в воде, при обработке ее коагулянтом - сернокислым алюминием, проводимой как без подщелачивания воды, так и с ее подщелачиванием.

Для ориентировочных подсчетов дозу коагулянта следует определять по СНиП 2.04.02-84, которая в пересчете на безводные $Al_2(SO_4)_3$; $Fe_2(SO_4)_3$; $FeCl_3$ при обработке мутных вод принимается (в зависимости от содержания примесей) от 25 до 80 мг/л. При коагулировании воды с повышенной цветностью доза коагулянта находится по формуле $D_k = 4Ц^{0,5}$, где $Ц$ - цветность воды, град.

Оптимальная доза коагулянта определяется на основании результатов пробного коагулирования воды, которое служит не только для определения дозы коагулянта и флокулянта, но и для выбора вида реагентов и условий их ввода в обрабатываемую воду.

Пробное коагулирование выполняется следующим образом: в несколько цилиндров (до 10 штук) емкостью 0,5-1 л наливается исходная (предварительно хлорированная или озонированная) вода, затем в цилиндры вводится раствор коагулянта определенной концентрации и объемом, рассчитанным на конкретный диапазон доз реагента. Смешение коагулянта с водой осуществляется или опрокидыванием цилиндров, или перемешиванием воды стеклянной палочкой с резиновым смесителем на конце, или, что предпочтительнее – с помощью установки пробного коагулирования с механическими мешалками (рис. 2.10). Установка позволяет осуществлять быстрое и медленное смешение реагентов с водой, соответствующее условиям пребывания воды в смесителе и камере хлопьеобразования.

Обычно лабораторная установка для проведения пробного коагулирования состоит из шести стаканов вместимостью 0,5-1 л и шести мешалок с общим электроприводом. Устройство обеспечивает одинаковые условия перемешивания реагентов с обрабатываемой водой во всех пробах и, таким образом, позволяет точно оценить влияние на эффект очистки воды типа или дозы реагента.



Рис. 2.11. Установка для проведения пробного коагулирования.

Проба воды разливается по стаканам, потом после включения мешалок во все стаканы одновременно добавляется раствор коагулянта. Быстрое перемешивание осуществляется при скорости вращения мешалок 160-180 об/мин. Через 1-2 мин при необходимости вводится флокулянт, время смешения флокулянта с водой 30 с. Затем интенсивность перемешивания уменьшается до 30-40 об/мин, продолжительность медленного перемешивания составляет 10-20 мин в зависимости от условий обработки воды на сооружениях.

Затем пробы воды остаются в покое в течение 30 мин для осаждения образовавшихся хлопьев. С учетом явления гравитационной коагуляции (столкновения и слипания частиц в результате различных скоростей осаждения) период 30 мин для слоя воды толщиной 10 см в наибольшей степени соответствует условиям осаждения хлопьев в производственных отстойниках глубиной 3-4 м за 2-3 ч.

При проведении пробного коагулирования в цилиндрах время осаждения хлопьев может быть увеличено. Осаждение в стаканах или цилиндрах

осуществляется при моделировании двухступенчатой схемы обработки воды с отстаиванием и фильтрованием.

В некоторых случаях уже на основании визуального наблюдения выбирается необходимая доза коагулянта. Однако для более точного определения дозы коагулянта отстоенная вода фильтруется через предварительно приготовленные, промытые горячей дистиллированной водой бумажные фильтры. В отстоенной воде измеряется рН. В фильтрате определяются мутность, цветность, концентрация остаточного алюминия, перманганатная окисляемость.

При наличии на станции сооружений контактного осветления воды после введения и смешения (быстрого и медленного) коагулянта с обрабатываемой водой в цилиндрах вода сразу фильтруется через бумажные фильтры с определением тех же показателей, что и в предыдущем случае. Результаты исследований выражаются в виде зависимости оптической плотности, мутности или цветности, перманганатной окисляемости, остаточного алюминия от дозы коагулянта. Примерный вид графика представлен на рис. 2.4.

Результаты экспериментов показывают, что предлагаемая в СНиП 2.04.02-84 формула расчета дозы коагулянта по цветности воды, может быть использована лишь для определения ориентировочной дозы, необходимой для расчета и проектирования реагентного хозяйства станции, но не может применяться для определения дозы реагента при эксплуатации очистных сооружений и достижения качества воды по всем показателям.

Анализ результатов пробного коагулирования показывает, что во многих случаях дозы, установленные в лаборатории при пробном коагулировании в основном соответствуют дозам, применяемым на сооружениях. В то же время можно отметить, что доза на сооружениях в ряде случаев несколько (на 0,1-0,5 мг/л) меньше, чем оптимальная в пробном коагулировании. Это, очевидно, можно объяснить тем, что на сооружениях за счет длительного процесса очистки улучшается сорбция гидроокисью алюминия органических

загрязнений и повышается глубина их удаления (цветность и перманганатная окисляемость) даже в случаях с уменьшением дозы коагулянта относительно установленной при пробном коагулировании.

При этом концентрация остаточного алюминия, как правило, на сооружениях больше, чем при пробном коагулировании за счет остаточной мутности после фильтровальных сооружений станции, в то время как при пробном коагулировании достигается более глубокая очистка воды от мутности на бумажных фильтрах.

Дозу ПАА, считая по безводному продукту, можно определить в зависимости от места его ввода. Так, при вводе перед сооружениями I ступени, согласно СНиПу, в зависимости от мутности и цветности исходной воды она варьируется в пределах 0,2...1,5 мг/л, а при вводе перед фильтрами при двухступенчатой очистке - 0,05...0,1 мг/л, при вводе перед фильтровальными сооружениями при одноступенчатой очистке - 0,2...0,6 мг/л.

Флокулянты следует вводить в воду через 1...3 мин. после ввода коагулянта. При очистке мутных вод допускается введение в воду флокулянтов до коагулянтов или одновременно.

При предварительном хлорировании, которое предусматривается для улучшения хода коагуляции и обесцвечивания воды, а также для поддержания водоочистных сооружений в надлежащем санитарном состоянии, доза хлора принимается 2...4 мг/л. Реагент следует вводить в воду за 1...3 мин. до поступления коагулянта и тщательно перемешивать.

При наличии в исходной воде фенолов рекомендуется применять ее *преаммонизацию* путем введения в воду перед хлорированием аммиака или аммонийных солей в количестве 20...25% (по NH_3) от дозы хлора.

При низкой щелочности исходной воды для обеспечения успешной коагуляции ее приходится *подщелачивать*, для чего в нее вводят известь или соду в количествах, определяемых по формуле

$$D_{\text{щ}} = K_{\text{щ}}(D_{\text{к}}/e_{\text{к}} - \text{Щ}_0) + 1, \quad (2.2)$$

где $D_{\text{к}}$ - максимальная в период подщелачивания доза безводного коагулянта, мг/л; Щ_0 - минимальная щелочность исходной воды, мг-экв/л; $K_{\text{щ}}$ - коэффициент, равный для извести (по CaO) - 28 и для соды (по Na_2CO_3) - 53; $e_{\text{к}}$ - эквивалентная масса коагулянта (безводного), мг-эквл, принимаемая для $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ - 57, FeCl_3 - 54, $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ - 67.

При отрицательной величине $D_{\text{щ}}$ подщелачивание не требуется. Щелочные реагенты следует вводить одновременно с вводом коагулянта или до него.

2.2.3. Повышение эффективности реагентной обработки воды

Как показывает опыт эксплуатации действующих водопроводных станций, работающих по традиционной технологии, более половины из них не могут обеспечить выполнение требований СанПиН по мутности, остаточному алюминию и перманганатной окисляемости. Существующие трудности (постоянные или периодические) во многих случаях связаны с процессом коагулирования воды и зависят от множества технических и технологических причин.

Нормативные документы ограничивают содержание остаточного алюминия на уровне 0,2 мг/л, что ставит достаточно сложную задачу по выполнению данного норматива на водопроводных станциях. Особенно трудно решить проблему уменьшения концентрации остаточного алюминия в питьевой воде при использовании для очистки воды сульфата алюминия.

Вторая сложная задача, существующая на водопроводных станциях – это выполнение нормативных требований по содержанию в питьевой воде органических загрязнений, характеризуемых показателем перманганатной окисляемости. Во многих случаях содержание органических загрязнений в исходной воде поверхностных водисточников варьируется от 8 до 16 мг O_2 /л.

Как известно из опыта работы водопроводных станций и результатов многочисленных исследований, традиционные реагентные схемы очистки воды обеспечивают уменьшение концентрации органических загрязнений и снижение величины пермангантной окисляемости (ПО) в среднем на 50-60 %. Чтобы достичь ПДК по показателю ПО (5 мгО₂/л), на многих водопроводных станциях необходимо повысить глубину очистки воды за счет оптимизации режима реагентной обработки воды и реконструкции очистных сооружений.

Глубина удаления загрязнений при очистке воды коагулированием существенно зависит от дозы коагулянта. Это подтверждается результатами многочисленных исследований, выполненных на воде различных водоисточников, в том числе Драгинским В.Л. и Алексеевой Л.П.

В связи с уменьшением норматива по остаточному алюминию с 0,5 до 0,2 мг/л во многих случаях при очистке воды поверхностных водоисточников основным показателем, диктующим необходимую степень очистки воды, может быть остаточный алюминий. В то же время концентрация остаточного алюминия зависит от качества исходной воды и глубины ее очистки по таким показателям, как мутность, цветность, ПО и др.

Как правило, при очистке цветных маломутных вод взвешенные вещества, которые остаются в очищенной воде после фильтров или контактных осветлителей, состоят в основном из продуктов гидролиза коагулянта, что обуславливает повышение концентрации остаточного алюминия. В связи с этим содержание остаточного алюминия может зависеть от мутности воды. Уменьшение содержания в воде мутности и соответственно остаточного алюминия достигается путем интенсификации процессов осветления: повышения эффективности хлопьеобразования и улучшения работы отстойников и фильтров.

В определенных условиях в обработанной воде могут присутствовать и растворенные соединения алюминия, которые не задерживаются при осветлении воды в отстойниках и на фильтрах.

Повышение в воде концентрации растворенного алюминия, как правило, связано с образованием комплексных его соединений с гумусовыми веществами. Комплексообразование алюминия с органическими веществами происходит путем взаимодействия ионов алюминия с их функциональными группами.

Образование растворимых комплексных соединений алюминия с гумусовыми веществами подтверждается зависимостью концентрации алюминия от цветности воды после коагуляции. Чем больше остаточная цветность воды, тем выше концентрация остаточного алюминия при условии отсутствия взвешенных веществ в воде.

Кроме того, растворимость продуктов гидролиза сульфата алюминия зависит от величины pH воды, ее ионного состава и температуры. По имеющимся литературным данным, подтвержденным экспериментальными исследованиями, в диапазоне pH 4,5-5,5 и 7,2-8,0 в воде после коагуляционной обработки может содержаться от 0,05 до 0,5 мг/л остаточного алюминия в виде растворенных соединений. Принято считать, что основные соединения, которые могут находиться в равновесии с гидроокисью алюминия $\text{Al}(\text{OH})_3$ при $\text{pH} < 6$ – Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})_2^{2+}$ и $\text{Al}_8(\text{OH})_{20}^{4+}$, а при $\text{pH} > 6$ – $\text{Al}(\text{OH})_4^-$.

Присутствие органических веществ, обуславливающих цветность воды, может повысить растворимость продуктов гидролиза коагулянта и значительно сузить (до 6,5-7,0) диапазон значений pH, в котором растворимость этих соединений минимальна. При этом, чем больше остаточная цветность воды, тем выше концентрация растворенного алюминия, и тем уже диапазон оптимальных значений pH.

Таким образом, для выполнения нормативных требований по остаточному алюминию необходимо осуществлять более глубокую очистку воды по снижению как мутности, так и цветности. Кроме того, процесс коагуляции следует проводить при оптимальных значениях pH для уменьшения количества растворенных соединений алюминия в очищенной воде.

Анализ опыта работы водопроводных станций и полученные Драгинским В.Л., Алексеевой Л.П. и другими исследователями данные показывают, что для большинства станций, а практически для всех действующих станций и очистных сооружений, основной проблемой и главной технологической задачей являются совершенствование и оптимизация режима реагентной обработки воды с применением коагулянтов.

Основными факторами, существенно влияющими на интенсификацию процесса коагуляции примесей воды в объеме, являются следующие:

1) С увеличением дозы коагулянта до оптимальной скорость хлопьеобразования возрастает. Способствуют этому процессу также повышение температуры и перемешивание воды. В зимнее время при низких температурах очистка воды сульфатом алюминия протекает неудовлетворительно. Коагулирование примесей воды в образующейся при гидролизе коагулянта коллоидной системе – самый медленный процесс, тормозящий хлопьеобразование и осаждение гидроксида алюминия. Это объясняется тем, что при низких температурах снижаются подвижность коллоидных частиц и частота их соударений, обуславливающих агрегацию. Снижение температуры воды от 20 до 1 °С увеличивает период коагуляции примерно в 1,5 раза вследствие уменьшения кинетической подвижности примесей воды и повышения ее вязкости, которая при температуре 1 °С примерно в 2 раза выше.

2) Подвижность примесей воды в процессе коагуляции увеличивается при ее перемешивании. Так, улучшение хлопьеобразования наблюдается при улучшении работы гидравлических смесителей за счет удлинения времени перемешивания и других факторов. Но самым существенным этапом, позволяющим значительно повысить эффективность хлопьеобразования и последующего осветления взвеси, является механическое перемешивание обрабатываемой воды с введенным в нее коагулянтом.

3) Предварительная обработка воды окислителями также повышает эффективность коагуляции. Это объясняется тем, что окислители разрушают гидрофильные органические соединения, стабилизирующие дисперсные примеси воды, и облегчают условия протекания коагуляции. Особенно эффективно применение окислителей при обработке маломутных цветных вод. При этом возрастает гидравлическая крупность хлопьев коагулированной взвеси и интенсифицируется осветление воды.

На основании изложенного возможные методы улучшения очистки воды коагулированием могут быть разделены на несколько групп:

а) изменение режима реагентной обработки в пределах используемого на станции сульфата алюминия и ПАА;

б) добавление к существующей технологии дополнительных реагентов или минеральных и сорбционных материалов;

в) рециркуляция коагулированной взвеси в зону введения коагулянта;

г) перемешивание воды аэрацией или использование в смесителях и камерах хлопьеобразования механического смешения реагентов с водой;

д) замена сульфата алюминия и ПАА на другие более эффективные в данных условиях коагулянты и флокулянты;

е) применение окислителей: хлора, озона и др.;

ж) использование физических методов в дополнение к реагентной обработке воды: обработка воды в магнитном и электрическом поле; воздействие ультразвуком или ультрафиолетовым облучением и др.;

з) улучшение или изменение технического и технологического состояния очистных сооружений, в частности, отстойников и фильтров, а также режима и условий их эксплуатации.

Как видно из перечисленного неполного перечня мероприятий, часть из них выполняется в пределах существующей технологии, другие требуют определенной (небольшой или существенной) реконструкции сооружений или изменения технологической схемы обработки, и, наконец, некоторые

предложения требуют нового строительства и применения нового технологического оборудования.

Решения по применяемым методам должны приниматься в зависимости от качества исходной воды и приоритетных видов ее загрязнений, для которых подбираются оптимальные условия коагулирования (вид и доза коагулянтов и флокулянтов, место и порядок их введения, предварительное окисление хлором или другими окислителями, режимы перемешивания и пр.), которые позволяют обеспечить необходимую степень очистки воды в процессе ее осветления.

Из этих же условий, а также из анализа работы водопроводной станции и результатов технологических изысканий, проведенных на объекте, выбираются и дополнительные методы обработки воды.

Ниже остановимся подробнее на каждом из методов совершенствования процесса реагентной обработки воды коагулированием.

Изменение способа реагентной обработки воды

Обычно коагулянт вводится в обрабатываемую воду непрерывно одной полной дозой в определенную точку. Со времени использования реагентной обработки воды на многих водопроводных станциях применялись различные способы введения коагулянта, позволяющие уменьшить расход реагента и соответственно уменьшить эксплуатационные расходы на его приобретение.

К таким способам относились:

- фракционное введение реагента;
- раздельное (концентрированное) коагулирование;
- прерывистое коагулирование;
- работа на дефицитных дозах коагулянта и пр.

Фракционное (дробное) коагулирование предусматривает добавление расчетного количества коагулянта к воде не одной, а двумя или несколькими последовательными порциями через определенные промежутки времени.

Технологический эффект, достигаемый при фракционировании дозы коагулянта, с кинетической точки зрения можно объяснить образованием в результате гидролиза первых порций коагулянта твердой фазы, выступающей в роли центров хлопьеобразования при гидролизе последующих порций коагулянта, что приводит к более полному использованию промежуточных комплексов алюминия. Так, например, полностью доза коагулянта может быть введена несколькими порциями в различные точки смесителя или перед поступлением воды в камеру хлопьеобразования.

Фракционирование дозы коагулянта может обеспечить более эффективное снижение цветности и уменьшение концентрации остаточного алюминия.

Раздельное (концентрированное) коагулирование заключается в дозировании всего количества коагулянта лишь в часть обрабатываемой воды. После смешения с коагулянтом поток обработанной воды объединяют (обычно в начале камер хлопьеобразования) с потоком остальной, некоагулированной воды.

При использовании этого метода может быть получена экономия коагулянта до 20 % и достигнуто более глубокое снижение остаточного алюминия и дополнительное уменьшение мутности и цветности воды. Преимущества концентрированного коагулирования объясняются тем, что распределение всего коагулянта в части воды создает условия для ускоренного хлопьеобразования, а после смешения с необработанной водой хлопья, сформированные в условиях повышенной концентрации коагулянта, способствуют лучшему протеканию процессов осветления воды.

Прерывистое (периодическое) коагулирование основано на более полном использовании свойств продуктов гидролиза коагулянта при их избытке. Оно содержит элементы метода концентрированного коагулирования и состоит в чередовании периодов подачи в обрабатываемую воду увеличенных доз коагулянта с периодами полного прекращения коагулирования. Например, в течение 2 ч воду коагулируют необходимой дозой, затем 2 ч воду не

коагулируют; при этом уменьшается расход коагулянта на 30-40 %, а также уменьшается нагрузка на очистные сооружения.

Работа на дефицитных дозах коагулянта наиболее эффективна в случаях контактной коагуляции воды и приводит, естественно, к экономии коагулянта, порой за счет некоторого ухудшения качества воды.

Все эти предлагаемые методы не всегда дают положительные результаты и существенно зависят от pH воды. Так, при обработке малоцветных вод при высоких значениях pH (от 7,6 до 8) фракционное введение коагулянта приводит к образованию растворенных продуктов гидролиза алюминия, обладающих малой величиной положительного заряда или даже отрицательным зарядом, что затрудняет взаимодействие продуктов гидролиза с отрицательно заряженными гумусовыми веществами и образование твердой фазы.

Метод концентрированного коагулирования также существенно зависит от свойств обрабатываемой воды. По-видимому, в условиях низких значений pH могут формироваться развитые полимерные структуры, на которые дальнейшее повышение pH (за счет смешения с основным потоком воды) не оказывает заметного действия.

Ранее (до 1995-1999 гг.) на многих водопроводных станциях проводилось периодическое коагулирование воды или применялся один из способов, указанных выше. Однако в то время основными ингредиентами, определяющими степень и глубину очистки воды при коагулировании, являлись в основном мутность или цветность воды и концентрация остаточного алюминия. При таком проведении коагулирования не всегда удавалось обеспечить значения цветности воды ниже 20 град, и требовалось получение разрешения Санэпидстанции на повышение величины цветности до 30-35 град.

Во многих случаях в зимний период при небольших значениях мутности и цветности (до 1,5-2 мг/л и 20-25 град) на ряде станций коагулирование вообще прекращалось, так как вода по этим показателям отвечала требованиям действовавшего тогда ГОСТ 2874-82 «Вода питьевая».

Анализ качества очищенной воды при работе в режиме прерывистого коагулирования показал, что величина показателя ПО в зависимости от периода года изменялась от 5,2 до 7,5 мгО₂/л, а концентрация остаточного алюминия достигала предела ПДК и составляла 0,45-0,48 мг/л.

С введением в действие СанПиН 2.1.4.1074.01 и появлением ПДК на показатель перманганатной окисляемости при обычной схеме обработки воды выполнить новые требования на водопроводных станциях без изменения режима очистки воды, как правило, стало невозможно.

Как было установлено, чаще всего диктующими показателями качества в процессе осветления воды коагулированием были не только цветность и мутность, но и концентрация остаточного алюминия или перманганатная окисляемость. Поэтому вопреки существующей ранее практике экономии коагулянта и стремлению работать на меньших дозах обеспечение норматива по перманганатной окисляемости требует порой повышения необходимых доз коагулянта.

Кроме того, введение новых микробиологических показателей и повышенных требований к ним также создает необходимость проведения постоянного коагулирования воды, даже в зимнее время, повышения глубины очистки воды по всем показателям для обеспечения надежности работы водопроводной станции в целом.

Практически на всех водопроводных станциях в дополнение к коагулянту применяют полиакриламид. В соответствии с рекомендациями нормативных документов разрыв во времени между введением реагентов должен составлять 2 мин. Однако на практике оба реагента часто вводят практически в одну точку. В результате такого введения эффективность хлопьеобразования существенно снижается. Поэтому для эффективного использования флокулянта должно быть обеспечено определенное время между начальным моментом коагуляции и введением флокулянта в соответствии с рекомендуемым разрывом во времени. Этот промежуток времени может изменяться в зависимости от качества

исходной воды, в основном от ее мутности, температуры и технологического режима обработки воды на конкретной водопроводной станции. Устанавливается он путем пробного коагулирования и флокулирования.

При обработке маломутных цветных вод и особенно в холодные периоды года хлопьеобразование протекает вяло, хлопья образуются мелкие, практически не оседающие в отстойниках. В таких случаях вся нагрузка ложится на фильтровальные сооружения, в результате уменьшается продолжительность фильтрационных циклов и увеличивается количество промывок, качество воды при этом – не всегда удовлетворительное.

В эти периоды года на станциях целесообразно использовать метод контактной коагуляции на фильтрах с введением реагента непосредственно перед фильтрующей загрузкой. Подача раствора реагента может осуществляться перед каждым фильтром или в сборный канал (или трубопровод), подающий воду из отстойников.

Регулирование величины pH воды

Как было показано выше, pH исходной воды существенно влияет на процесс коагулирования и качество очищенной воды в отношении остаточного алюминия, особенно при использовании сульфата алюминия.

В случае, если очищенная вода содержит остаточный алюминий в виде растворимых комплексов с органическими веществами в области значений pH 7,3-7,7, то с помощью незначительного увеличения дозы коагулянта можно добиться дополнительного снижения цветности и одновременно снижения pH. Это будет способствовать уменьшению растворимости продуктов гидролиза сульфата алюминия и соответственно уменьшится концентрация остаточного алюминия.

При низких значениях pH, характерных для коагуляционной обработки воды с малой исходной щелочностью, также возможно образование растворимых комплексных соединений алюминия с органическими

веществами, которые не задерживаются фильтрующей загрузкой. Поэтому при очистке цветных вод с низкой исходной щелочностью необходимо тщательно подбирать дозы коагулянта и подщелачивающего реагента (извести или соды) в целях глубокого снижения цветности при значениях рН 6,1-6,4, обеспечивающих минимальную растворимость гидроксидов алюминия.

В одном случае подщелачивание следует проводить в два этапа: до коагулянта и после коагулянта перед отстойником или даже перед фильтрами. Первая доза обеспечивает проведение коагулирования гумусовых веществ при оптимальных низких значениях рН 5,5-6,0, а вторая способствует ускорению образования осадка гидроксида алюминия и улучшению осветления воды.

В некоторых случаях наиболее целесообразно проводить подщелачивание воды после ее обработки коагулянтом. При этом достигается более глубокое снижение цветности и соответственно концентрации растворенного алюминия при меньших дозах коагулянта. Полученный эффект объясняется тем, что при введении коагулянта в воду до подщелачивающего реагента взаимодействие гидрокомплексов алюминия с гумусовыми веществами проходит при благоприятных для этого процесса низких значениях рН. Последующее повышение рН снижает растворимость образовавшихся продуктов гидролиза алюминия, и они в виде твердой фазы задерживаются на очистных сооружениях.

Применение минеральных замутнителей или сорбционных материалов

Для улучшения протекания коагуляционных процессов, особенно при обработке маломутных цветных вод, в исходную воду добавляются различные материалы, в частности, осуществляется замутнение воды, например глиной.

Внесение искусственных замутнителей, частицы которых играют роль дополнительных центров коагуляции, способствует повышению скорости хлопьеобразования при очистке маломутных вод. Замутнение резко усиливает флокулирующее действие полиэлектролитов.

Одновременно с этим происходит утяжеление хлопьев коагулированной взвеси, увеличение их гидравлической крупности. При замутнении воды большую роль играет степень дисперсности вводимых частиц. Существенно (на 30-60 %) ускоряется процесс хлопьеобразования при добавлении частиц размером меньше 3 мкм. Рекомендуется вводить в воду высокодисперсную глинистую взвесь в количестве 10 мг/л.

Однако в настоящее время широкого распространения этот метод не получил, возможно, в связи с необходимостью дозирования в воду еще одного реагента. Кроме того, сам принцип увеличения количества взвешенных веществ при их отсутствии в исходной воде является несколько порочным, так как целесообразнее найти более приемлемый и эффективный способ очистки маломутной воды.

Для повышения прочности и плотности хлопьев, их адгезионной и сорбционной способности предлагаются различные методы, основанные на добавлении порошкообразного клиноптилолита, порошкообразного активного угля (ПАУ). В качестве замутнителя может рассматриваться известь и промывная вода, возвращаемая в «голову» сооружений.

Использование физических методов

К физическим методам относятся:

- магнитная обработка. Считается, что омагничивание воды изменяет свойства продуктов гидролиза алюминия;
- наложение электрического поля, которое интенсифицирует процесс коагуляции за счет ускорения процессов формирования и осаждения коагулированной взвеси, полученной при обработке сульфатом алюминия природных вод;
- воздействие ультразвуком.

Эффективность указанных методов однозначно не подтверждается. С одной стороны, исследователи показывают, что они улучшают процесс очистки

воды, в других работах даются противоположные результаты. Может быть, поэтому указанные методы не нашли применения в технологии очистки воды в коммунальном хозяйстве.

Механическое смешение реагентов с водой

Значительное влияние на процесс образования хлопьев и их свойства оказывают интенсивность и продолжительность смешения реагентов с водой, а это в свою очередь влияет на процесс осветления и качество очищенной воды.

Для того чтобы достигнуть эффективной очистки воды от коллоидно-взвешенных веществ, необходимо обеспечить наиболее благоприятные условия для гидролиза коагулянтов и максимальную скорость образования мицелл и агрегатов золь на первом этапе процесса коагуляции в свободном объеме, а также максимальную скорость образования достаточно крупных и быстрооседающих хлопьев на последующем этапе.

Одним из наиболее эффективных методов интенсификации процесса коагулирования воды является повышение интенсивности перемешивания коагулянта с водой. В этом случае увеличивается плотность хлопьев и ускоряется процесс их осаждения. Как показывает опыт эксплуатации очистных сооружений водопроводных станций, перемешивание, осуществляемое в гидравлических смесителях и камерах хлопьеобразования, явно недостаточно эффективно для создания оптимальных условий осветления воды.

Важным этапом при очистке воды коагулированием является нейтрализация коллоидных частиц загрязнений. Время коагуляции очень мало, и наилучшие результаты достигаются при условии, когда коллоидные частицы полностью нейтрализованы до образования хлопьев в форме гидроксида металла. Поэтому считается, что назначение смесителей состоит не только в равномерном распределении коагулянта в обрабатываемой воде до момента образования хлопьев во всей массе, но и в чрезвычайно быстром смешении,

чтобы коагулянт вступил в контакт с максимальным числом частиц загрязнений до того, как закончатся реакции гидролиза и полимеризации. Это имеет решающее значение для последующих стадий коагуляции и экономии коагулянта.

Гидравлические смесители, как правило, не обеспечивают оптимального протекания процессов коагуляции, особенно в холодное время года из-за повышения вязкости дисперсионной среды и уменьшения степени гидролиза коагулянта, в результате очищенная вода не всегда соответствует стандарту по мутности и остаточному алюминию.

Другим важным этапом, от которого зависит эффективность очистки воды, обработанной минеральными и органическими реагентами, является процесс образования хлопьев (ортокинетическая коагуляция), протекающий в камерах хлопьеобразования.

Равномерное медленное перемешивание в камере хлопьеобразования благоприятствует укрупнению мелких хлопьев, способных сравнительно легко осаждаться в отстойниках.

Общим недостатком всех гидравлических камер хлопьеобразования является то, что в них невозможно изменить интенсивность турбулизации потока при изменении условий, например, при понижении температуры воды или ее состава. Они не позволяют регулировать интенсивность перемешивания и влиять на эффективность хлопьеобразования при изменении качества исходной воды по сезонам года, а иногда и в течение более короткого времени.

Использование механических мешалок в смесителях и камерах хлопьеобразования позволяет поддерживать устойчивый режим хлопьеобразования независимо от расхода обрабатываемой воды, а также регулировать режим перемешивания при изменении качества воды. Они повышают эффективность очистки воды благодаря обеспечению оптимальной интенсивности смешения, т. е. способствуют образованию более плотных хлопьев, отделению углекислоты и ускорению процесса седиментации.

Целесообразность применения механических мешалок подтверждается опытом работы водоочистных станций за рубежом и в России.

Применение механических смесителей и камер хлопьеобразования взамен гидравлических позволяет достичь следующих результатов:

- повысить степень осветления воды в отстойниках;
- уменьшить грязевую нагрузку на фильтровальные сооружения;
- улучшить качество очищенной воды по основным показателям;
- обеспечивается возможность регулирования процесса хлопьеобразования, которое необходимо при изменении качества и температуры исходной воды. Это позволяет повысить надежность и стабильность работы водопроводных станций даже в условиях значительных колебаний качества исходной воды;
- значительно интенсифицируется процесс хлопьеобразования по сравнению с процессом в гидравлической камере и обеспечивается сокращение времени пребывания воды в отстойниках;
- в отдельные периоды года снизить дозу коагулянта.

Применение современных реагентов: коагулянтов и флокулянтов

Когда в практике водоснабжения использовались только два традиционных классических реагента — сульфат алюминия и полиакриламид, то при обсуждении интенсификации процессов коагулирования говорилось о мероприятиях, связанных с этими двумя основными реагентами.

В настоящее время имеется громадный арсенал новых коагулянтов и флокулянтов анионного и катионного типа, что позволяет подбирать наиболее эффективные реагенты для каждой конкретной станции водоподготовки, и даже для отдельных сезонов года.

Применение окислителей: хлора и озона

Первичное хлорирование воды осуществляется не только для обеззараживания, но и для борьбы с планктоном, поддержания необходимого санитарного состояния водоочистных сооружений, а также для снижения цветности и интенсификации процессов коагуляции. Введение хлора обычно предшествует коагуляции.

Предварительное озонирование воды предназначено для удаления загрязнений антропогенного происхождения, таких как фенолы, нефтепродукты, синтетические поверхностно-активные вещества (СПАВ), пестициды, амины и многие другие, которые практически не удаляются на сооружениях с традиционной технологией очистки. Озонирование применяется также для удаления загрязнений природного происхождения:

- гуминовых веществ, обуславливающих цветность воды;
- специфического запаха и привкуса, появляющегося при повышенных концентрациях планктона, а также для устранения выделяемых планктоном ядовитых веществ;
- привкусов и запахов (почвы, плесени, травы, рыбы и др.), продуцируемых различными водными организмами;
- неорганических соединений, таких как железо, марганец, сероводород.

Кроме того, озон является более эффективным, чем хлор, дезинфицирующим реагентом в отношении спор и вирусов, а также его роль существенна при обеззараживании воды.

Наиболее целесообразно озонирование применять совместно с сорбционной очисткой, при этом достигается глубокое удаление из воды органических загрязнений, обеспечивается высокое качество питьевой воды.

Практически во всех случаях установлено, что предварительное озонирование позволяет повысить качество очищенной воды по мутности, цветности и перманганатной окисляемости. В некоторые периоды существует оптимальная доза озона, при которой концентрация остаточного алюминия в очищенной воде меньше, чем в неозонированной очищенной.

2.3. Смешение реагентов с водой и камеры хлопьеобразования

2.3.1. Смесители

Основополагающим условием успешного коагулирования примесей воды является равномерное и быстрое распределение реагентов в её объеме для обеспечения максимального контакта частиц примесей с промежуточными продуктами гидролиза коагулянта, существующими в течение короткого промежутка времени, так как процессы гидролиза, полимеризации и адсорбции протекают за несколько секунд. Первая фаза конвективной коагуляции – перекинетическая, заканчивается, когда первичные хлопья достигают размеров 1-10 мкм, что совпадает с периодом быстрого распределения коагулянта в обрабатываемой воде. Недостаточное смешение влечет за собой перерасход реагентов и малую скорость агломерации примесей воды при данной дозе. Поэтому необходимо обеспечить оптимальные условия смешения реагентов с водой, при которых коагулянт вступил бы в контакт с максимальным числом частиц примесей воды до того, как произойдут реакции гидролиза и полимеризации.

Эффективность действия коагулянта повышается при увеличении интенсивности смешения. При этом дозы реагентов и время, необходимые для их полного распределения в воде, уменьшаются с повышением градиента скорости. В водоподготовке наметилась тенденция к применению смесителей, обеспечивающих чрезвычайно быстрое распределение коагулянта в обрабатываемой воде. В основном это механические и трубчатые смесители.

Интенсивность перемешивания воды с растворами реагентов оценивается градиентом перемешивания G .

$$G = \sqrt{\frac{N_{\text{вд}}}{\mu}} = \sqrt{\frac{E}{W \cdot t \cdot \mu}}, \text{ с}^{-1} \quad (2.3)$$

где $N_{y\partial}$ – удельный поток энергии, определяемый как мощность, отнесенная к единице объема перемешиваемой воды; E – энергия, затрачиваемая на смешение воды; μ – динамический коэффициент вязкости; W – объем воды в смесителе; t – продолжительность смешения.

Режим смешения оценивается критерием Кэмпа.

$$K = G \cdot t = t \sqrt{\frac{N_{y\partial}}{\mu}} \quad (2.4)$$

где t – продолжительность смешения, с.

Для равномерного и быстрого смешения реагентов с водой их следует вводить в точках наибольшей турбулентности потока.

При изменяющемся качестве исходной воды в различные сезоны года, особенно при наличии в ней устойчивой дисперсной фазы, необходимо регулирование процессов перемешивания воды с реагентами. Оптимальным режимом можно считать такой, при котором продолжительность перемешивания будет минимальной, а хлопьеобразование обеспечит образование прочных агрегатов хлопьев с возможно большим содержанием в них твердой фазы.

Смешение реагентов с водой происходит в несколько этапов:

этап 1 – неравномерное распределение реагента в массе потока;

этап 2 – выравнивание неравномерности распределения реагента, происходящее благодаря переносу примеси крупномасштабными пульсациями, а также вследствие одновременно происходящего массового распада крупномасштабных пульсаций.

этап 3 – равномерное распределение реагента во всем потоке (объеме) в результате массового, многократного измельчения пульсаций с частичным затуханием их.

Для равномерного и быстрого смешения реагентов с водой их следует вводить в зонах наибольшей турбулентности потока в нескольких точках его сечения. Как доказали результаты исследований в НИИ КВОВ, АКХ для смешения реагентов с водой необходимо предусматривать реагентораспределители (устройства ввода реагентов, рис. 2.4), обеспечивающие их быстрое равномерное распределение в подающем канале или трубопроводе, и смесители, где происходит последующее интенсивное смешение введенных реагентов с обрабатываемой водой. Реагентораспределители рекомендуется выполнять в виде перфорированных трубчатых систем или вставок в трубопровод, представляющих собой местные сопротивления. Потерю напора в трубопроводе при установке указанных устройств соответственно принимают 0,1...0,2 и 0,2...0,3 м.

Реагенты смешивают с обрабатываемой водой в смесительных устройствах (сопла Вентури, диафрагмы), трубчатых смесителях или в специальных сооружениях – смесителях, которые должны удовлетворять требованию полного и быстрого смешения реагентов со всей массой воды (время пребывания воды в этих сооружениях 0,5-2 мин.).

Смесители – это сооружения, в которых происходит смешение реагентов с обрабатываемой водой.

Смесители классифицируют на гидравлические и механические. Они бывают открытыми (с открытым зеркалом воды) и закрытыми (работающими под давлением).

Гидравлические смесители – сооружения, работа которых основана на принципе использования для смешения непосредственно энергии самой воды.

К гидравлическим смесителям, хорошо зарекомендовавшим себя на практике, следует отнести: коридорного типа (с вертикальным и горизонтальным движением воды); дырчатый (напорный и безнапорный), перегородчатый с разделением потока; вертикальный вихревой.

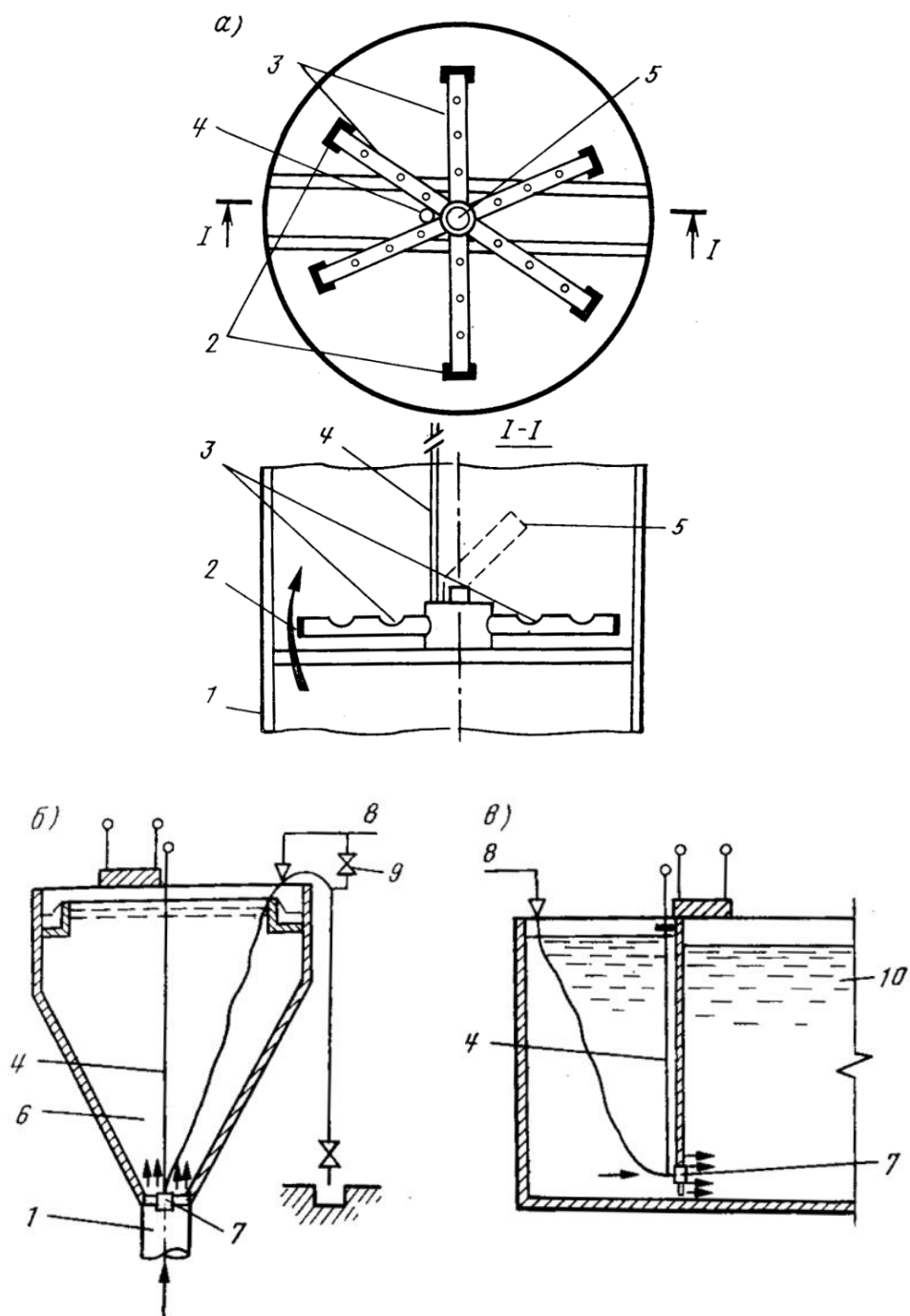


Рис. 2.12. Перфорированный распределитель коагулянта (а) и его размещение в вихревом смесителе (б) и перегородчатом (в):

1 – трубопровод обрабатываемой воды; 2 – заглушка; 3 – перфорированная трубка-луч; 4 – разъемная штанга; 5 – штуцер для присоединения шланга подачи коагулянта; 6 – вихревой смеситель; 7 – реагентораспределитель; 8 – подача коагулянта через приемную воронку; 9 – зарядка сифона; 10 – перегородчатый смеситель

Классификация гидравлических смесителей.

а) по характеру сопротивления:

- с переменным сопротивлением (ершовый, вихревой, перегородчатый, гидравлический прыжок в быстройтоке);
- с постоянным сопротивлением (дырчатый, стаканчатый, труба Вентури, диафрагма в трубе, гидравлический прыжок в трубе и при истечении из-под щита).

б) по степени аэрации потока:

- сильно аэрирующие поток (гидравлический прыжок с истечением из-под щита);
- незначительно аэрирующие поток (ершовый, перегородчатый, гидравлический прыжок в быстройтоке);
- слабо, или вовсе не аэрирующие поток (дырчатый, диафрагма в трубе, труба Вентури).

в) по использованию турбулентного потока:

- использующие турбулентность искусственно создаваемых местных сопротивлений (ершовый, дырчатый, стаканчатый, перегородчатый, труба Вентури, диафрагма в трубе);
- использующие турбулентность изменения состояния потока (гидравлический прыжок в каналах, трубах, «перепад»);
- использующие турбулентность искусственных потоков (лотки, трубы и желоба, приспособляемые для смешения).

Работа смесителей гидравлического типа основана на использовании турбулентности потока, создаваемой местными сопротивлениями путем трехкратного увеличения в них скорости движения воды с 0,4-0,6 до 1 м/с. Гидравлические смесители отличаются конструктивной простотой и эксплуатационной надежностью, однако при расходах обрабатываемой воды меньше расчетных они не обеспечивают надлежащего эффекта смешения. Кроме того, недостатком способов смешивания реагентов в гидравлических смесителях является невозможность регулирования степени турбулизации и

времени пребывания в смесителе в зависимости от расхода обрабатываемой воды и её качества.

Выбор типа и конструкции смесителя определяется компоновкой водоочистного комплекса с учетом его пропускной способности и методов обработки воды, а также технологическими соображениями. Число секций смесителей принимается не менее двух, резервные аппараты не предусматриваются.

Широкое распространение получили **перегородчатые смесители** с разделением потока (рис. 2.13). Такой смеситель представляет собой железобетонный лоток с тремя (как минимум) щелевыми перегородками, установленными перпендикулярно оси сооружения. При движении в щелях со скоростью 1 м/с за ними образуются вихревые течения, что способствует быстрому и полному смешению реагента с водой. Расстояния между перегородками должны равняться двойной ширине лотка.

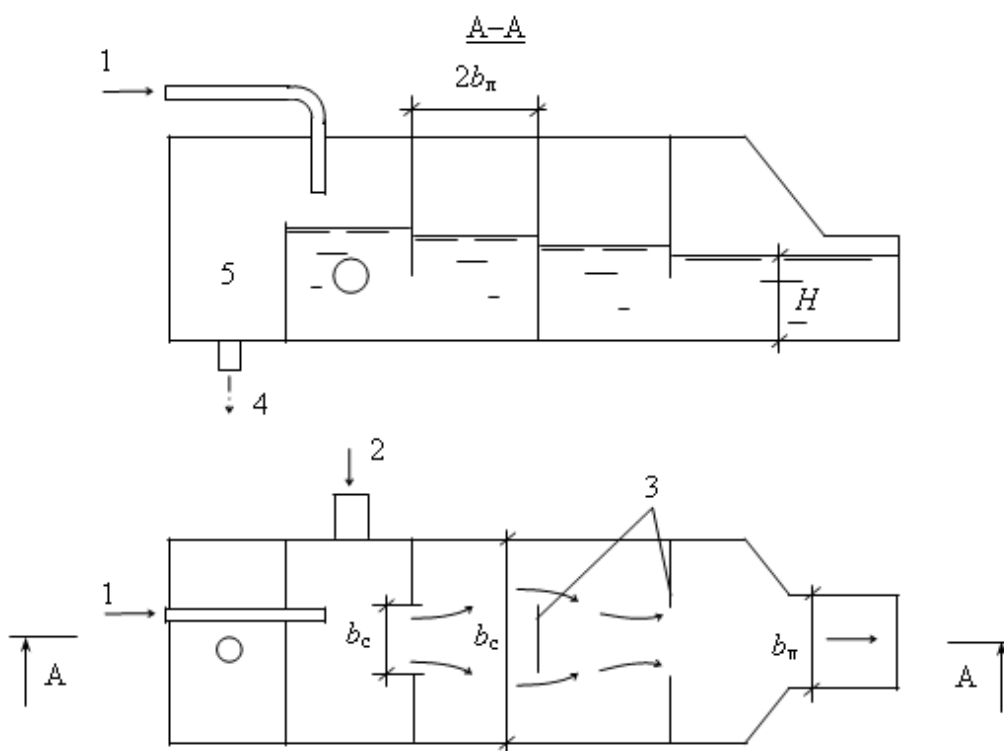


Рис. 2.13. Перегородчатый смеситель:

1 – подача коагулянта; 2 – подача исходной воды (из водоисточника);

3 – перегородки; 4 – переливная труба; 5 – переливная камера

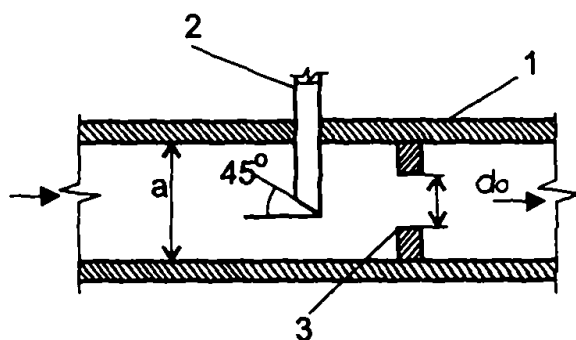


Рис. 2.14. Шайбовый смеситель:

1 – трубопровод; 2 – трубка для ввода реагентов; 3 – шайба

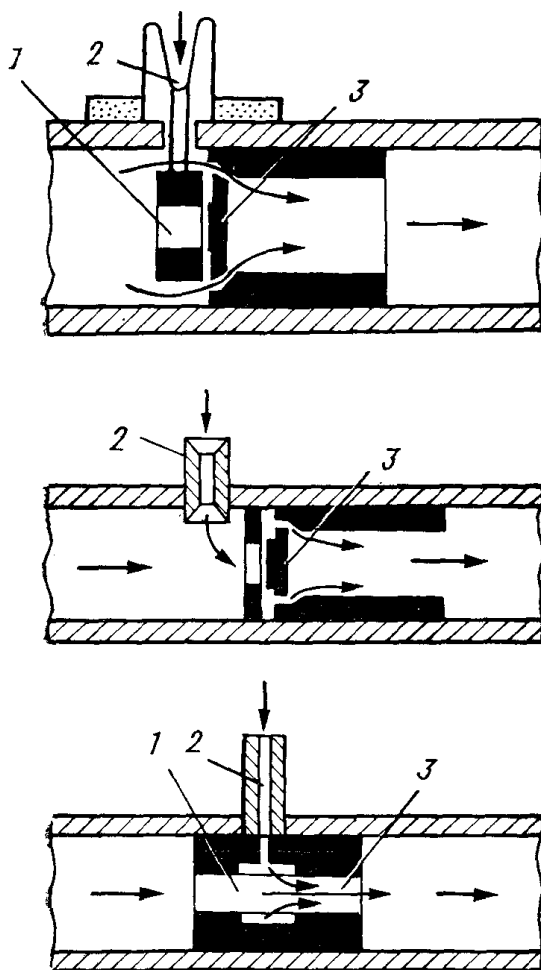


Рис. 2.15. Трубчатые смесители:

1 – распределитель реагента; 2 – подача реагента; 3 – местное сопротивление

Одним из приёмов интенсификации и улучшения процесса коагуляции является мгновенное перемешивание воды с коагулянтom в диафрагмовом или

шайбовом смесителе (рис. 2.14) перед поступлением её в камеру хлопьеобразования или на контактные осветлители или фильтры. Использование этого устройства на установках небольшой пропускной способности позволяет создать наиболее благоприятный режим для смешения, в результате чего расход коагулянта снижается до 25%.

На небольших водоочистных установках применяют **трубчатые смесители**, которые характеризуются значительными потерями напора (рис. 2.15).

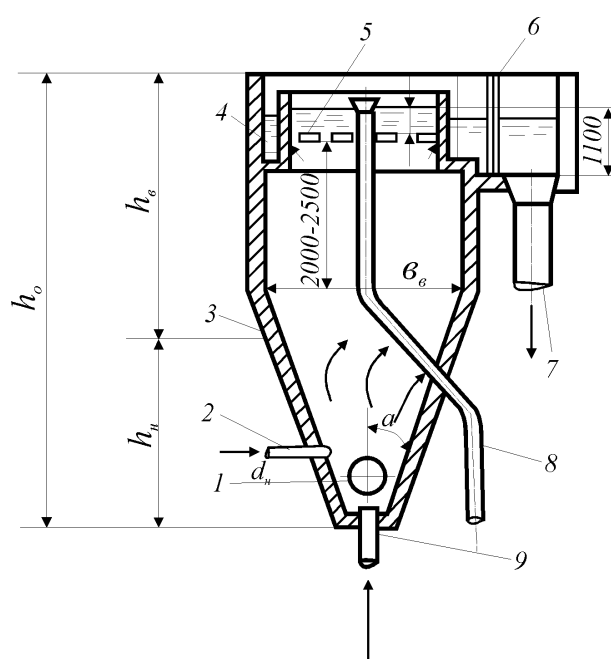


Рис. 2.16. Вертикальный смеситель:

1 – подвод воды; 2 – подвод реагентов; 3 – бетонный корпус; 4 – кольцевой желоб; 5 – затопленные отверстия; 6 – сетка; 7 – отвод воды; 8 – перелив; 9 – трубопровод для опорожнения

Для водоочистных комплексов с осветителями рекомендуются **вертикальные (вихревые) смесители** в виде круглого (или квадратного) в плане резервуара с конической (или пирамидальной) нижней частью при угле конусности 30-45 градусов (рис. 2.16). В нижнюю часть конуса (или пирамиды) подводят обрабатываемую воду со скоростью 1,2-1,5 м/с и туда же, только с противоположной стороны, через специальные патрубки вводят растворы

реагентов. Восходящая скорость движения воды в цилиндрической части смесителя высотой 1-1,5 м должна быть 30-40 мм/с, благодаря чему частицы реагента находятся во взвешенном состоянии. Отвод воды из смесителя производится периферийным лотком со скоростью 0,6 м/с или дырчатыми трубами с затопленными отверстиями, или центрально расположенной затопленной воронкой.

Дырчатый смеситель представляет собой лоток с дырчатыми перегородками, установленными перпендикулярно направлению движения воды (рис. 2.17). Вода, проходя через отверстия со скоростью 1 м/с, испытывает завихрения, что способствует её хорошему перемешиванию с реагентами. Диаметр отверстий принимают 20-100 мм. Верхний ряд отверстий должен быть затоплен под уровень воды на 0,1-0,15 м во избежание подсоса воздуха.

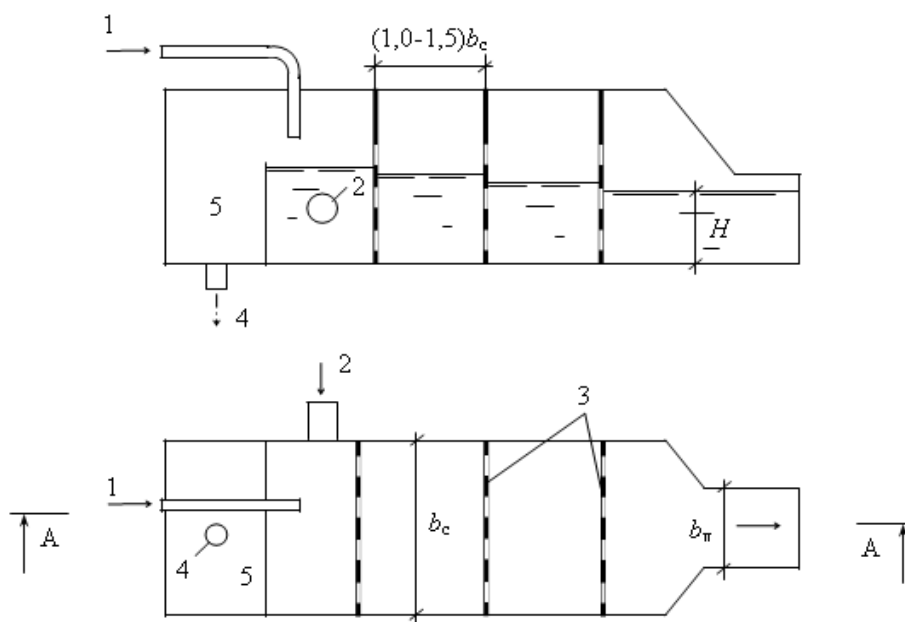


Рис. 2.17. Дырчатый смеситель:

1 – подача коагулянта; 2 – подача исходной воды; 3 – перегородки; 4 – переливная труба; 5 – переливная камера

Для лучшего смешения раствора реагентов с обрабатываемой водой и сокращением длины участка рекомендуется устраивать сужения в напорном

водоводе в виде **трубы Вентури** или **диафрагмы (шайбы)**. Эти сужения позволяют несколько снизить пьезометрическое давление в месте ввода раствора реагентов в трубопровод и, следовательно, высоту расположения дозатора и обуславливают появление вихревых потоков в обрабатываемой воде, что благоприятствует смешению ее с реагентами.

Смеситель **эжекторного типа** служит для смешения реагентов непосредственно в напорном трубопроводе или во всасывающей трубе насоса.

На крупных водоочистных комплексах находят применение перегородчатые **смесители коридорного типа** с вертикальным или горизонтальным движением воды со скоростью 0,6-0,9 м/с при времени пребывания в них 3-5 мин (рис. 2.18). Число поворотов на 180 градусов принимают равным 9-10. Следует предусматривать возможность сокращения числа перегородок для уменьшения времени пребывания обрабатываемой воды в смесителе в периоды интенсивного хлопьеобразования.

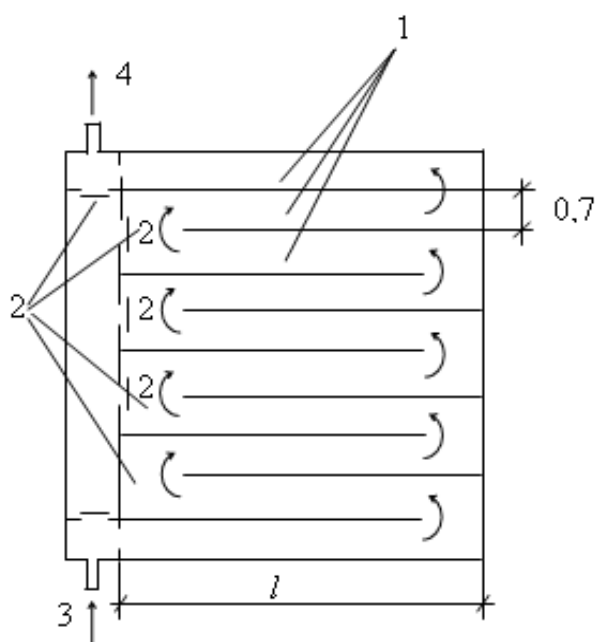


Рис. 2.18. Коридорный смеситель:

1 - коридоры; 2 - шиберы; 3 - подача исходной воды; 4 - отвод воды с реагентами

Оптимальный эффект коагуляции обеспечивает очень быстрый перенос частиц, который возможен только в высокоскоростных механических смесителях.

Механические смесители – сооружения, работа которых основана на принципе использования для смешения механической энергии (рис. 2.19). В механических смесителях турбулизация потока создается вращением лопастей или пропеллеров мешалки с электроприводом.

Классификация механических смесителей: лопастные (мешалки с плоскими лопастями); пропеллерные (мешалки с винтовыми лопастями); турбинные (смесители с турбинным колесом и насосы).

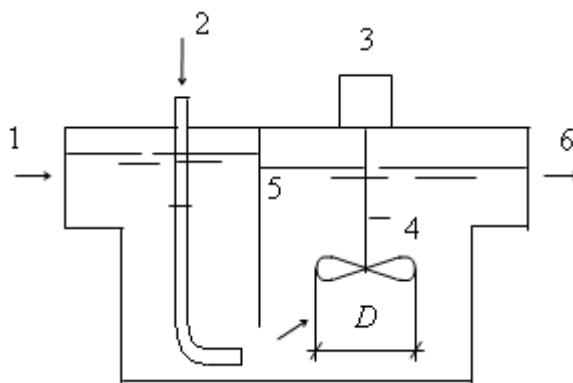


Рис. 2.19. Механический смеситель

1 – подача исходной воды; 2 – подача реагента; 3 – двигатель с приводом для мешалки; 4 – механическая мешалка; 5 – перегородка; 6 – отвод воды с реагентом

Применение механических смесителей связано с повышенными затратами электроэнергии и требует соответствующего обоснования. Однако такие смесители позволяют снизить удельные капитальные затраты, уменьшить расход реагентов, сократить время пребывания воды в отстойниках и осветлителях со слоем взвешенного осадка, регулировать параметры смешения в соответствии с изменяющимся качеством и количеством обрабатываемой воды.

Механические смесители представляют собой круглые или квадратные в плане резервуары с соотношением высоты к ширине 2:1 с плоским или

коническим днищем. Время пребывания воды в таких смесителях составляет 30-60 с. Мощность двигателей механических смесителей принимается 1-1,5 кВт на каждые 1000 м³/ч производительности станции. Количество лопастей мешалок на одном валу зависит от принятой глубины камеры смесителя. Скорость вращения их для турбинных мешалок принимают в пределах 80-100 мин⁻¹, для пропеллерных – 1500-1800 мин⁻¹.

2.3.2. Камеры хлопьеобразования

Для завершения второй стадии конвективной коагуляции примесей воды – ортокинетической используют камеры хлопьеобразования, которые предназначены для создания оптимальных условий для хлопьеобразования. На эффективность процесса и размеры формирующихся хлопьев при медленном перемешивании обрабатываемой воды влияют его интенсивность (градиент скорости) и продолжительность; характер и дисперсность примесей; солевой состав, щелочность и pH воды; доза коагулянта, а также силы адгезии, удерживающие частицы примесей в агломерированном состоянии. Агломерация образующихся в процессе гидролиза коагулянта хлопьев происходит постепенно в течение 6-30 минут и более.

Существенное влияние на процесс хлопьеобразования оказывают интенсивность и продолжительность перемешивания обрабатываемой воды в камерах хлопьеобразования. При этом основополагающей является интенсивность перемешивания $G = 50...60 \text{ с}^{-1}$; влияние продолжительности процесса проявляется в меньшей степени. Интенсивность перемешивания воды в камерах хлопьеобразования не должна быть большой, чтобы не разрушить образовавшиеся хлопья. Необходимая интенсивность перемешивания воды достигается изменением скорости её движения или частоты вращения мешалки во флокуляторах, а оптимальная продолжительность процесса обеспечивается надлежащим объемом сооружения.

По принципу действия камеры хлопьеобразования классифицируют на гидравлические и механические (флокуляторы и аэрофлокуляторы). Из камер гидравлического типа предпочтение отдают водоворотным, вихревым, перегородчатым и зашламленного типа. Все камеры, кроме перегородчатых, встраивают в отстойники. При числе камер хлопьеобразования менее 6 согласно СП необходимо предусматривать одну резервную. Конструкцию камеры хлопьеобразования следует выбирать исходя из качества исходной воды и типа отстойника.

К камерам хлопьеобразования гидравлического типа, хорошо зарекомендовавшим себя на практике, следует отнести камеры с псевдооживленной зернистой загрузкой, с циркуляцией осадка, с контактной загрузкой.

Вихревая камера хлопьеобразования (рис. 2.20) выполняется в виде прямоугольного в плане железобетонного с коническим или пирамидальным днищем резервуара (с углом конусности 50-70 градусов, обращенным вниз). Перемешивание воды в камере хлопьеобразования происходит при ее движении снизу вверх вследствие уменьшения скорости движения (от 0,8-1,2 до 0,004-0,005 м/с) в результате резкого увеличения площади поперечного сечения. Время пребывания воды в камере составляет от 6 (для мутных вод) до 12 минут (для цветных вод). Передачу воды из камеры в отстойники следует осуществлять при скорости ее движения в сборных лотках или трубах не более 0,05 м/с для цветных вод и 0,1 м/с – для мутных. Для интенсификации работы камеры в ее верхней части могут размещаться тонкослойные модули.

Водоворотная камера хлопьеобразования совмещается с вертикальным отстойником и располагается в центральном стакане (рис. 2.21, а). Вода распределяется в верхней части камеры соплом, расположенном на расстоянии 0,2 диаметра камеры от стенки, на глубине 0,5 м от поверхности воды, или соплами, закрепленными в её центре в виде неподвижного сегнерова колеса. Выходя из сопел со скоростью 2-3 м/с, вода приобретает вращательное

движение вдоль её стенок и движется сверху вниз. Для гашения вращательного движения воды при её переходе в отстойник, которое могло бы ухудшить его работу, внизу камеры устанавливают гаситель в виде решетки высотой 0,8 м с ячейками 0,5х0,5 м. Время пребывания воды в камере принимают 15-20 минут, а её высоту 3,5-4 м.

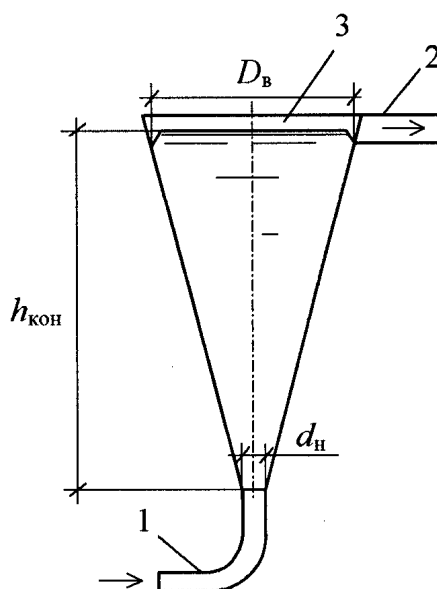


Рис. 2.20. Вихревая камера хлопьеобразования:

1 – подвод исходной воды; 2 – отвод воды после КХО; 3 – кольцевой желоб

Градиент скорости перемешивания в таких камерах определяют по формуле:

$$G = \left(\frac{\rho \cdot v^2 Q}{2w\eta} \right)^{0,5} \text{ с}^{-1}, \quad (2.5)$$

где v – скорость движения воды, м/с; ρ – плотность воды в кг/м³; η – вязкость воды в Па·с; Q – расход воды, м³/с; w – объем камеры, м³.

Перегородчатая камера хлопьеобразования (примыкает к горизонтальным отстойникам) представляет собой прямоугольный железобетонный резервуар с перегородками (рис. 2.22), образующими 9-10

коридоров шириной не менее 0,7 м, через которые последовательно проходит вода со скоростью 0,2-0,3 м/с в начале камеры и 0,05-0,1 м/с в конце.

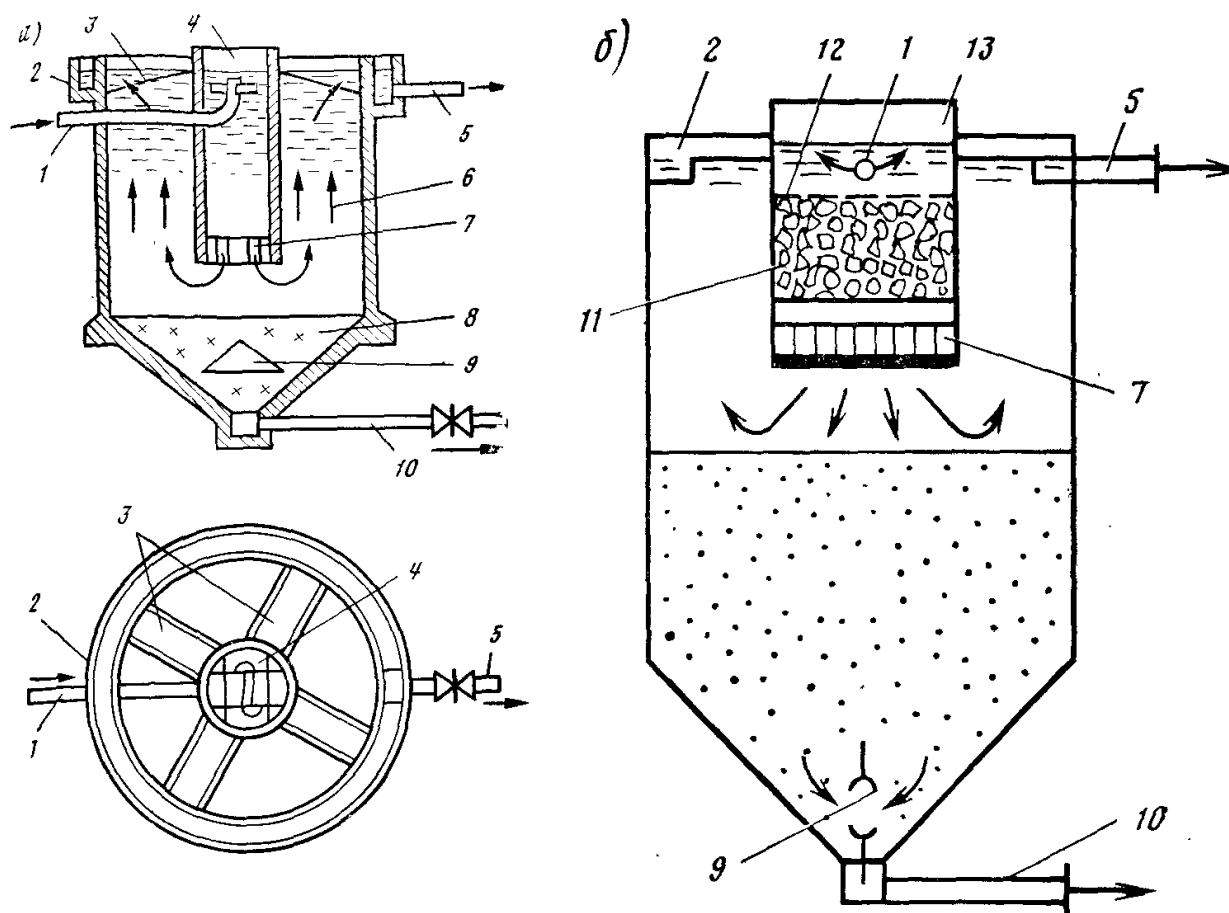


Рис. 2.21. Водоворотная (а) и контактная (б) камеры хлопьеобразования, встроенные в вертикальный отстойник:

1 и 5 – подача исходной и отвод осветленной воды; 2 и 3 – кольцевой и радиальные водосборные лотки; 4 – водоворотная камера; 6 – зона осветления воды; 7 – гаситель; 8 – зона накопления и уплотнения осадка; 9 – конусный отражатель; 10 – удаление осадка; 11 – контактная загрузка из вспененного полистирола; 12 – сетка; 13 – контактная камера

За счет увеличения ширины коридоров можно регулировать продолжительность пребывания обрабатываемой воды в камере в зависимости от её качества. Дно коридоров камеры выполняют с продольным уклоном 0,02-0,03 для удаления осадка при чистке. Среднюю глубину камера принимают 2-2,5 м, продолжительность пребывания воды в камере – 20-30 минут

(минимальное время для мутных вод, максимальное – для цветных вод с пониженной температурой).

Интенсивность перемешивания (градиент скорости) определяют для таких камер по формуле:

$$G = \left[\frac{(nv_1^2 + (n-1)v_2^2 Q\rho)}{2w\eta} \right]^{0.5}, \text{ с}^{-1} \quad (2.6)$$

где n – число перегородок; v_1, v_2 – скорости движения воды в коридорах камеры и на поворотах, м/с.

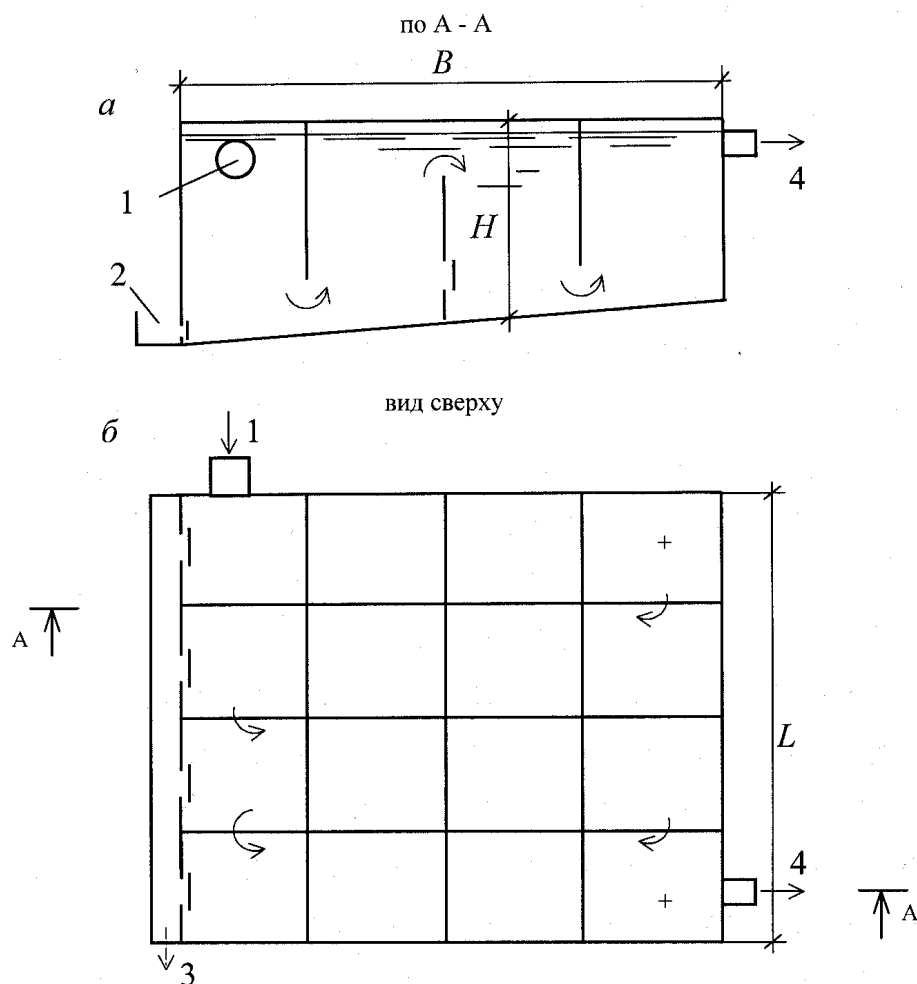


Рис. 2.22. Схема перегородчатой камеры хлопьеобразования с вертикальной циркуляцией воды:

a – разрез; b – план; 1 – подвод воды; 2 – сток; 3 – выпуск осадка; 4 – отвод воды

Камера хлопьеобразования зашламленного типа с вертикальными перегородками применяется для вод с мутностью до 1500 мг/л (рис. 2.23). Ее размещают в начале коридора отстойника и выполняют в виде железобетонного с пирамидальным днищем резервуара (с углом конусности 45 градусов). В основаниях перевернутых пирамид размещают напорные перфорированные водораспределительные трубы, расстояние между которыми в осях 2 м, от стенки камеры 1 м. Отверстия трубы диаметром не менее 25 мм направлены вниз под углом 45 градусов, их суммарная площадь составляет 30-40% площади сечения распределительной трубы. Скорость движения воды в распределительных трубах 0,4-0,6 м/с.

Для соблюдения постоянства скорости движения воды, перфорированные распределительные трубы необходимо выполнять телескопическими с косыми переходами.

При восходящей скорости потока 0,65-1,6 (для вод мутностью 50-250 мг/л) и 0,8-2,2 мм/с (для вод мутностью 250-1500 мг/л) образуется и поддерживается во взвешенном состоянии слой осадка из скоагулированных примесей высотой не менее 3 м, частицы которого являются центрами коагуляции. Время пребывания воды в камере не менее 20 минут. Применение подобных камер хлопьеобразования позволяет увеличить расчетную скорость осаждения взвешенных веществ в отстойниках при осветлении вод средней мутности на 15-20% и мутных на 20%. Передача воды из камеры в отстойник должна осуществляться при скорости её движения до 0,1 м/с для мутных вод и до 0,05 м/с – для цветных.

Использование контактных камер хлопьеобразования позволяет увеличить в 3-4 раза нагрузку на единицу объема камеры, снизить на 20-25% расход коагулянта, уменьшить примерно в 1,5 раза продолжительность отстаивания воды в отстойниках.

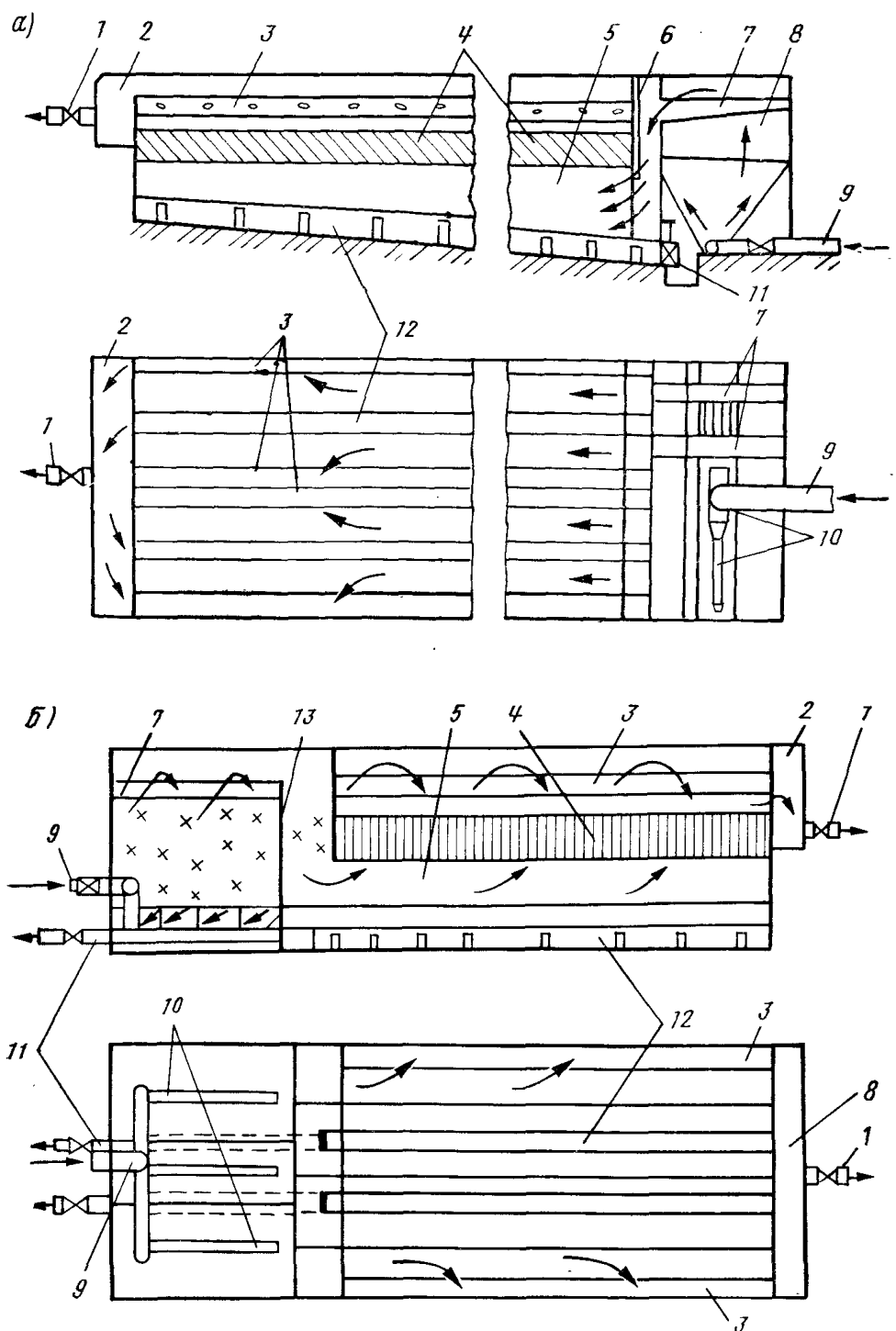


Рис. 2.23. Камеры хлопьеобразования вихревого (а) и зашламленного (б) типа, встроенные в горизонтальный отстойник:

1 – отвод осветленной и подача исходной воды; 2 – водосборный карман; 3 – лотки децентрализованного сбора осветленной воды; 4 – тонкослойные модули; 5 – зона осветления воды; 6 – струенаправляющая перегородка; 7 – лотки для сбора и отведения воды из камеры; 8 – камера хлопьеобразования; 10 – перфорированные водораспределительные трубы; 11 – удаление осадка из

*отстойника; 12 – коробка для сбора и удаления осадка из отстойника; 13 – затопленный водослив;
отделяющий камеру от отстойника*

При кондиционировании маломутных цветных вод хорошо зарекомендовала себя камера хлопьеобразования замшламленного типа с рециркуляцией осадка (рис. 2.24). Обрабатываемая вода, соплами вводимая в нижние части секций камеры со скоростью 1 м/с, поступает в центрально расположенные эжектируемые вставки и всасывает воду с осадком из объема секций. Таким образом, в каждой секции происходит непрерывное движение взвешенного осадка, обеспечивающее контактирование агрегативно неустойчивых примесей и их укрупнение. Постепенно обрабатываемая вода переходит из камеры в камеру и далее в отстойник. Время пребывания воды в камере 20-30 мин.

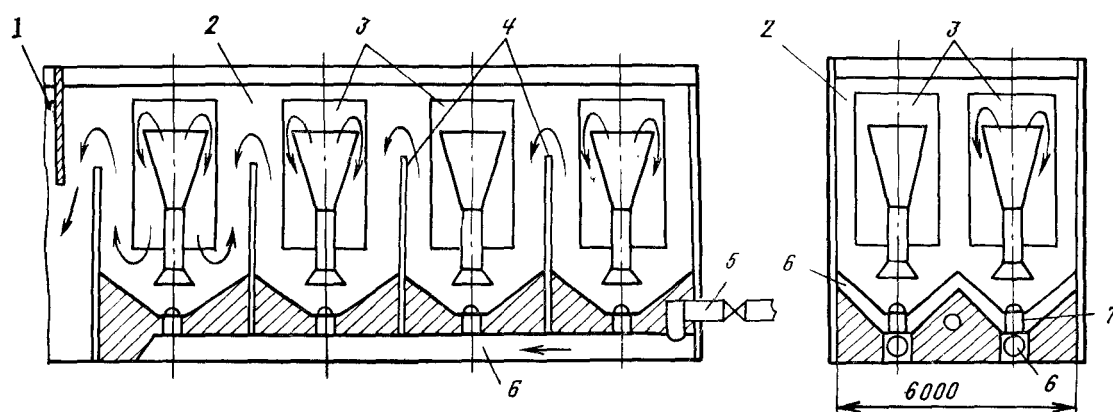


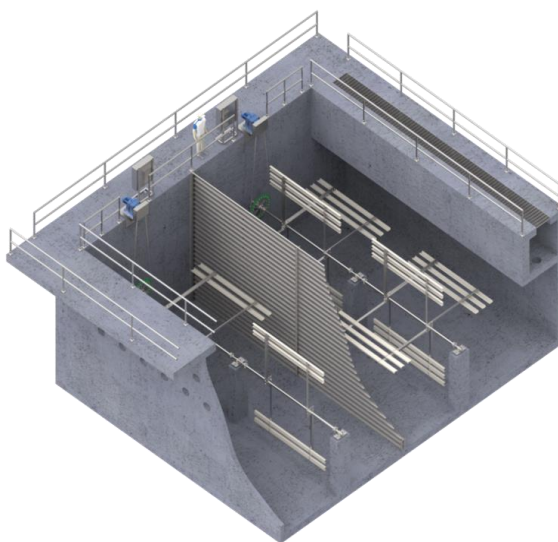
Рис. 2.24. Камера хлопьеобразования с рециркуляцией осадка:

1 и 2 – отстойник и камера; 3 – рециркуляторы; 4 – перегородки, разделяющие объем камеры на последовательно работающие секции; 5 – подача обрабатываемой воды; 6 – распределительная труба с соплами (7).

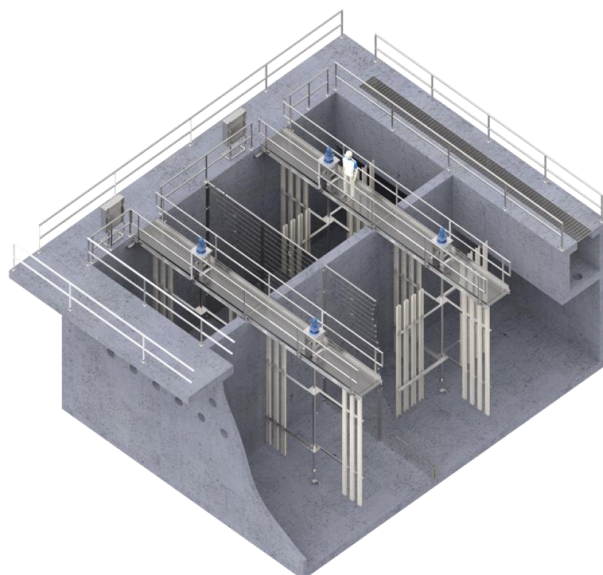
В механических камерах хлопьеобразования (флокуляторах), рекомендуемых для обработки мутных вод и применяемых на крупных водоочистных комплексах, плавное перемешивание воды для завершения процесса ортокинетической коагуляции её примесей осуществляется пропеллерными или лопастными мешалками, размещаемыми на

горизонтальных или вертикальных осях (рис. 2.25). Мешалка имеет одну или несколько лопастей. Флокуляторы обычно встраивают в горизонтальные отстойники и рассчитывают на время пребывания воды в них 30-40 минут (до 60 минут при реагентном умягчении). Число мешалок принимают 3-5. Скорость течения воды во флокуляторе снижается по ходу потока от 0,5 до 0,1 м/с за счет сокращения частоты вращения мешалок или уменьшающейся по ходу воды площади их лопастей. Окружную скорость вращения мешалок принимают 0,3-0,5 м/с адекватно качеству исходной воды.

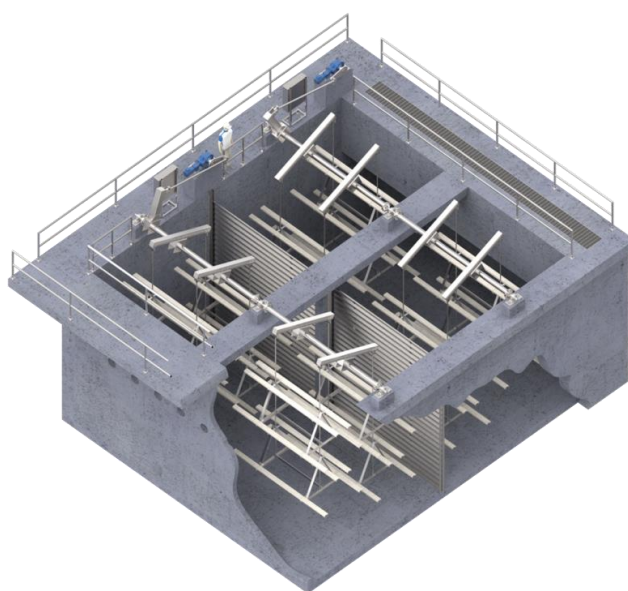
Преимуществами флокуляторов по сравнению с камерами гидравлического типа являются небольшие потери напора, простота конструкции, оптимизация процесса хлопьеобразования адекватно качеству обрабатываемой воды путем изменения частоты вращения мешалок; недостатками – дополнительный расход электроэнергии, высокие требования к материалам деталей, что удорожает сооружение в целом.



a)



б)



в)

Рис. 2.25. Камеры хлопьеобразования с мешалками

Градиент скорости перемешивания воды в них определяется по формуле:

$$G = \left(\frac{2\pi n N}{W \eta} \right)^{0,5}, \text{ с}^{-1} \quad (2.7)$$

n — число осей с лопастями.

Критерий Кэмпбелла для разных типов природных вод

Схема очистки воды	Критерий GT
Маломутные цветные воды, $pH = 5,5 \dots 6,5$, обрабатываемые сульфатом алюминия	$40 \cdot 10^3 \dots 55 \cdot 10^3$
То же, при $pH = 4,5 \dots 5,5$, обрабатываемые хлорным железом	$100 \cdot 10^3 \dots 150 \cdot 10^3$
Маломутные цветные воды, $pH = 5,5 \dots 6,8$, обрабатываемые ПАА	$200 \cdot 10^3 \dots 300 \cdot 10^3$
Воды средней мутности и средней цветности, $pH = 6 \dots 7$, обрабатываемые сульфатом алюминия	$25 \cdot 10^3 \dots 36 \cdot 10^3$
Воды средней мутности, $pH = 6,6 \dots 7,2$, обрабатываемые хлорным железом	$35 \cdot 10^3 \dots 50 \cdot 10^3$

Исследования флокуляторов, выполненные в МГСУ (Г.И. Николадзе, Ч.С. Лай), показали, что число цилиндрических секций камеры следует принимать не менее трех с зигзагообразной траекторией движения воды, структура градиента скорости должна быть убывающей по ходу воды от 100 до $25 \dots 50 \text{ с}^{-1}$ в последней секции, мешалки целесообразно размещать на вертикальной оси. Данные табл. 2.2 дают представление о величинах критерия Кэмпбелла при обработке вод разного состава.

Аэрофлокуляторы – барботажные камеры хлопьеобразования получают все более широкое распространение в технологии водоподготовки благодаря дешевизне и доступности воздуха, невысокой стоимости оборудования, высокого эффекта хлопьеобразования (рис. 2.26). При этом работа, совершаемая воздухом, осуществляется за счет разности его плотности с водой. Эффект хлопьеобразования в аэрофлокуляторах достигается в результате четырех одновременно протекающих процессов: выделения из воды избыточных количеств диоксида углерода, окисления кислородом воздуха

органических примесей, специфического механического перемешивания воды пузырьками воздуха и образования зародышей твердой фазы продуктов гидролиза на поверхности газовых пузырьков. В аэрофлокуляторах используют слабое пневматическое перемешивание, обычно с интенсивностью $0,15-0,25 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин})$, при этом расход воздуха не превышает 5% расхода обрабатываемой воды.

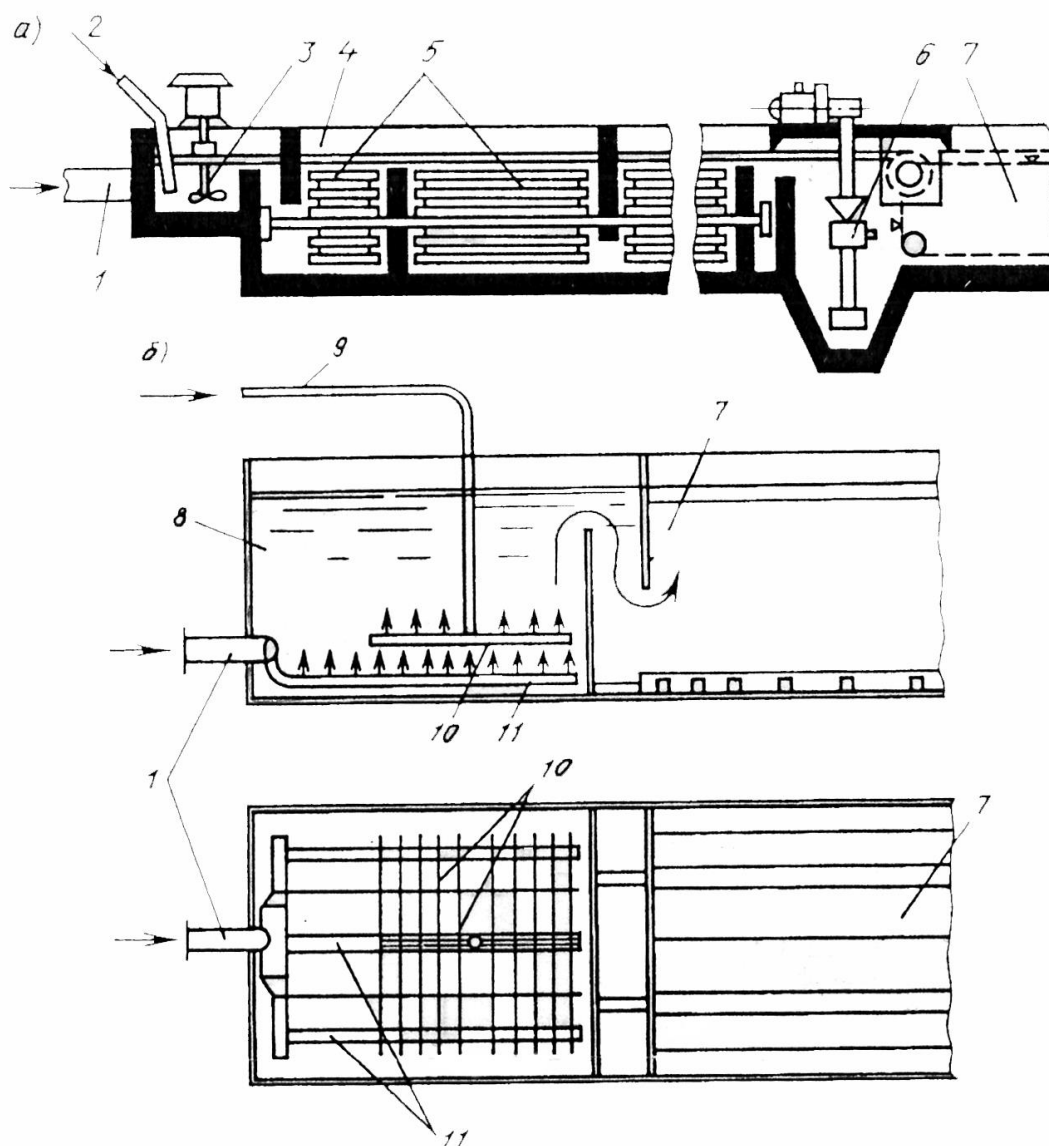


Рис. 2.26. Флокулятор (а) и аэрофлокулятор (б), совмещенные с горизонтальным отстойником:

1, 2 – подача воды и реагента; 3 – мешалка смесителя; 4 – флокулятор; 5 – мешалки на горизонтальной оси; 6 – грязевой насос; 7 – горизонтальный отстойник; 8 – камера флокулятора; 9 – подача воздуха; 10, 11 – воздухо- и водораспределительные трубчатые перфорированные системы

Аэрофлокулятор представляет собой прямоугольную в плане камеру, объем которой рассчитан на 6-12 минутное пребывание воды, с желобчатым днищем, встроенную в горизонтальный отстойник. В основании желобов днища уложены перфорированные распределительные трубы на расстоянии 20-30 см, над которыми перпендикулярно им располагают в виде решетки перфорированные или пористые водораспределительные трубы с шагом 1-1,5 м. Диаметр отверстий 1,5-2,5 мм, шаг 72-150 мм. Оптимальная высота слоя воды над барботажной системой составляет 2-4 м. Для аэрофлокуляторов оптимальное значение градиента скорости находится в пределах $25-45 \text{ с}^{-1}$, а коэффициент объемного использования возрастает в 1,5-2,5 раза по сравнению с таковым для камер гидравлического типа. При применении аэрофлокуляторов для обработки мутных вод производительность горизонтальных отстойников повышается в 1,5-2 раза.

2.4. Обработка воды на первом этапе

2.4.1. Микрофильтры, сетчатые фильтры

Процеживание воды через сетки из различных материалов применяется для извлечения из воды грубых примесей в виде речных наносов из песка, ила, листьев, прутьев, щепы, коры деревьев и кустарников, фито- и зоопланктона. Разделение суспензий на фильтрат и осадок происходит за счет создаваемой разности давлений ΔP , под действием которой фильтрат проходит через ячейки сетки, а грубые взвешенные и плавающие в воде частицы задерживаются на ней. Обычно, в технологии водоочистки из условий прочности свойств сеток и предотвращения проскока ранее образовавшегося осадка через сетку с

ячейками размером 20-60 мкм, рекомендуется принимать максимальное значение $\Delta P_{\max}$ к концу фильтроцикла: $\Delta P_{\max} \leq 0,1-0,2$ м

Оптимальным вариантом работы сетчатой фильтровальной установки применительно к водным суспензиям является такой, при котором при наименьших гидравлических сопротивлениях на сетке и в слое осадка и минимальных затратах на промывку фильтрующего полотна будет обеспечиваться максимальная скорость фильтрования при заданной степени очистки воды. Чтобы достичь такого режима работы, необходимо на основе анализа качества природной воды, правильно подобрать размер ячеек рабочего сетчатого полотна и назначить начальную скорость фильтрования v_c при заданном перепаде давления ΔP_o на сетке.

Сетчатые фильтры, имеющие плоскую или цилиндрическую (реже сферическую) поверхность, бывают периодического и непрерывного действия. Первые из них имеют неподвижную сетку, вторые – вращающуюся, обычно непрерывно промываемую с помощью специальных трубных систем с гидравлическими насадками.

В системах подготовки воды для хозяйственно-питьевых и технических целей наибольшее распространение получили *микрофильтры* и *барабанные сетки*. Конструкция микрофильтров идентична конструкции барабанных сеток. Микрофильтры являются разновидностью барабанных сеток, размер ячеек которых составляет 0,355х0,335 или 0,5х0,5 мм, размещаемых между двумя поддерживающими сетками с ячейками 10х10 мм, образующими фильтрующий элемент. Микрофильтры выполняют из металлических сеток с размером ячеек 20...60 мкм. Микрофильтры следует применять для удаления из воды крупных плавающих и взвешенных примесей, в том числе фито- и зоопланктона при количестве клеток более 1000 кл/мл, а при отсутствии последних – барабанные сетки.

Сетчатые фильтры следует размещать в зданиях станций водоподготовки. При соответствующем обосновании допускается их размещение на водозаборных сооружениях.

Микрофильтры выполнены из вращающегося барабана со сменными фильтрующими сетчатыми элементами с размером ячеек сеток 40×40 или 60×60 мкм, вала барабана с воронками для сбора промывной воды, привода, камеры расположения барабана, входного и выходного каналов, системы подачи и отвода промывной воды. Окружная скорость барабана – $0,1-0,3$ м/с. Глубина его погружения в воду в камере – $4/5$ диаметра барабана. Скорость фильтрования назначается в пределах от 5 до 25 л/с на 1 м^2 полезной площади микросетки, погруженной в воду. Потери напора на микросетке допускаются до $0,2$ м, а в установке в целом – до $0,5$ м. Расход промывной воды принимается до $1,5\%$ от расхода обрабатываемой воды. Давление промывной воды, подаваемой на спрыски – не менее $0,15$ МПа. Камеры должны оборудоваться спускными трубами. В подводящем канале камер следует предусматривать переливной трубопровод. Промывка сетчатых барабанных фильтров должна осуществляться водой, прошедшей через них.

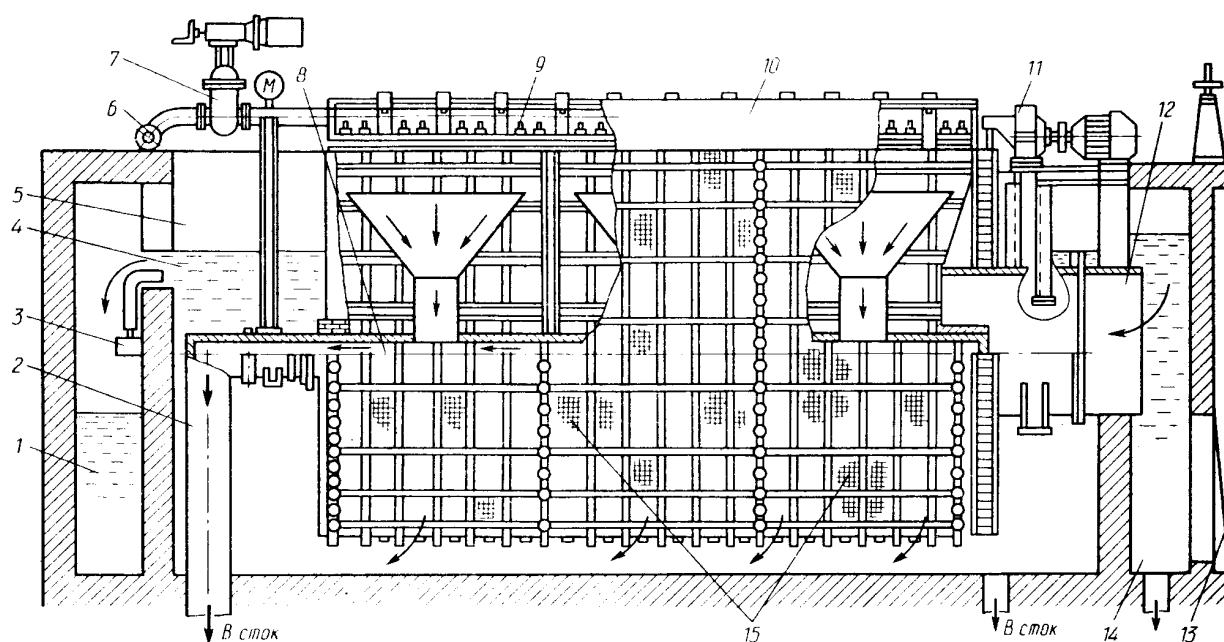


Рис. 2.27. Микрофильтр (барабанная сетка):

1 – сборный канал; 2 – трубопровод отвода промывной воды; 3 – датчик уровня; 4 – водосливное окно; 5 – камера; 6 – трубопровод подачи промывной воды; 7 – задвижка с электроприводом; 8 – центральная труба с воронками сбора промывной воды; 9 – пластинчатые разбрызгиватели; 10 – ограждение из оргстекла; 11 – редуктор с электроприводом; 12 – входное отверстие большого размера; 13 – шибер; 14 – подводящий канал исходной воды; 15 – барабан с фильтрующими элементами

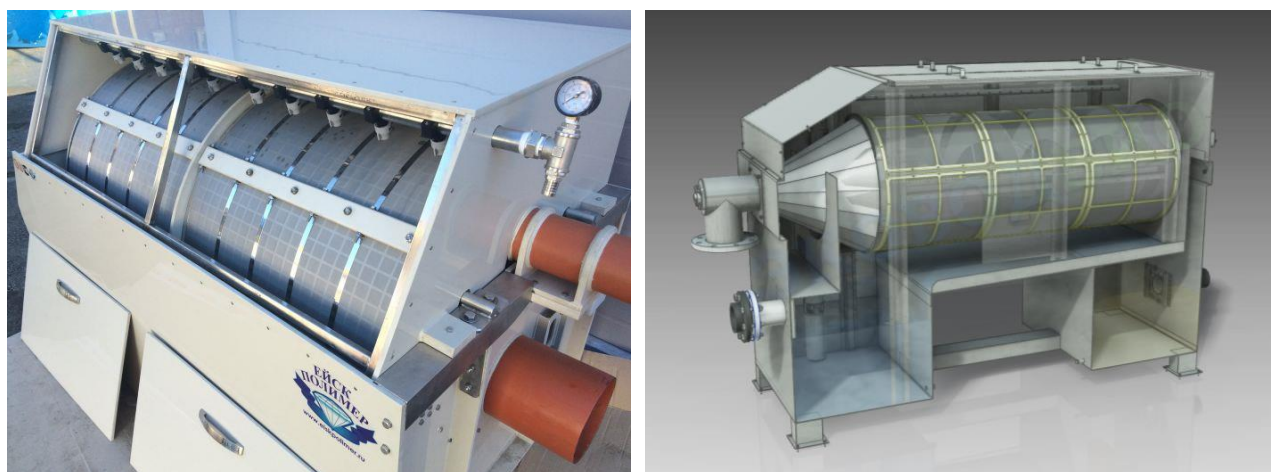


Рис. 2.28. Внешний вид микрофильтра

Сетчатые напорные установки различных типов, которые в зависимости от технических характеристик сеток (размеров и формы ячеек, типа плетения), конструктивных отличий и режимов работы, применяются в зарубежной практике для очистки воды от крупных механических загрязнений, взвеси и планктона, содержащихся в воде.

Использование сетчатых фильтров ограничивается, как правило, размером ячеек сетки до 75 мкм, так как применение сеток с ячейками меньших размеров приводит к резкому сокращению межпромывочного периода из-за интенсивного прироста потерь напора на фильтрующем элементе.

Конструкции сетчатых фильтров приведены на рис. 2.29 – 2.33. В большинстве фильтров реализован механизм промывки, при котором одна секция отделяется колпаком от потока исходной воды и через этот колпак промывная вода отводится в дренаж. Подача промывной воды со стороны

фильтрата осуществляется за счет давления, которое необходимо создавать в линии отвода фильтрата.

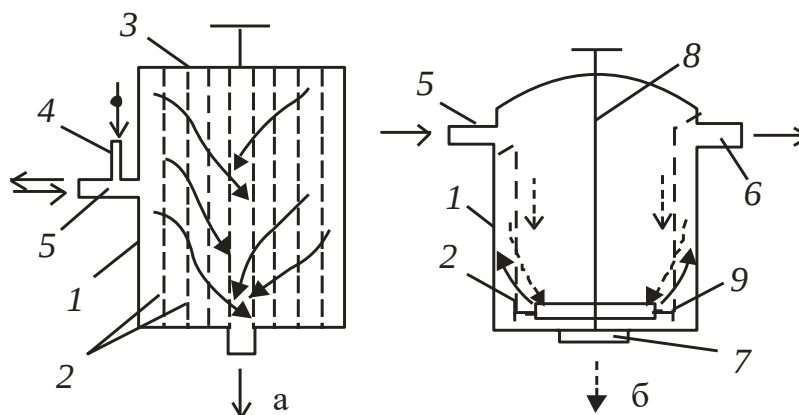


Рис. 2.29. Вертикальные сетчатые фильтры американских фирм «Drip-Eze» (а) и «Bermad» (б):

→ – направление движения фильтруемой воды; - - - → – направление движения промывной воды; — — — — — введение жидких реагентов; 1 – корпус; 2 – сетка; 3 – быстросъемная крышка; 4 – патрубок подачи жидких реагентов; 5 – патрубок подачи исходной воды; 6 – патрубок отвода фильтрата; 7 – патрубок сброса промывной воды; 8 – гидроцилиндр; 9 – диск со щетками.

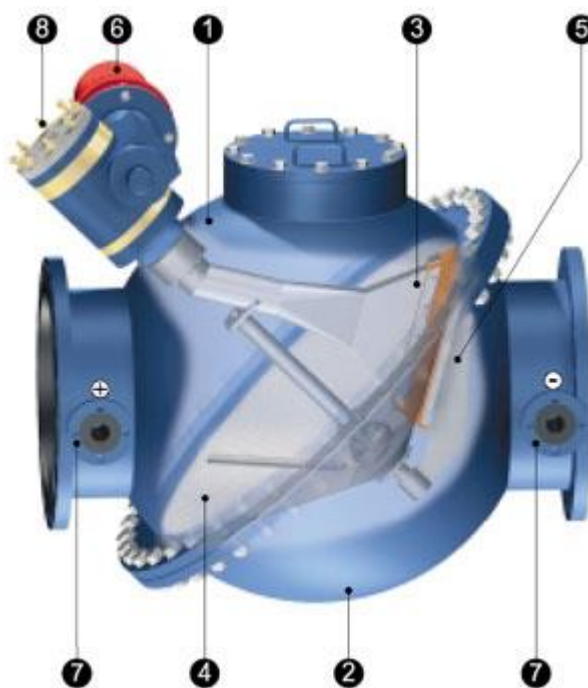


Рис. 2.30. Сетчатый фильтр PR-BW 100 с автоматической промывкой:

1 – корпус со стороны исходной воды; 2 – корпус со стороны фильтрата; 3 – ротор для обратной промывки; 4 – секция фильтра; 5 – бустер обратной промывки; 6 – приводной мотор; 7 – система измерения перепада давления; 8 – редуктор

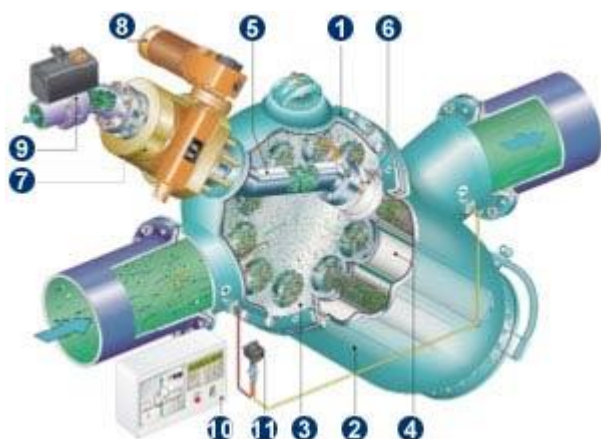


Рис. 2.31. Сетчатый фильтр PR-BW 100-FC с автоматической промывкой:

1 – корпус со стороны исходной воды; 2 – корпус со стороны фильтрата; 3 – перегородка с раздвижным сегментом; 4 – картридж с фильтрующим элементом; 5 – ротор для обратной промывки; 6 – насадка для обратной промывки; 7 – подшипник; 8 – приводной мотор; 9 – клапан для удаления промывной воды; 10 – панель управления; 11 – система измерения перепада давления

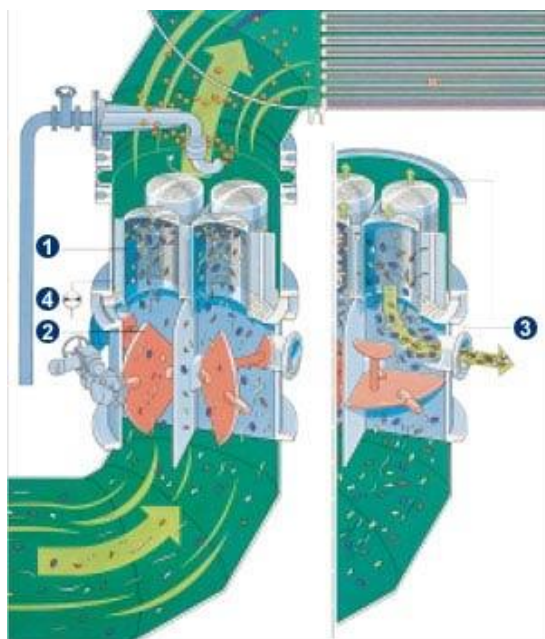


Рис. 2.32. Сетчатый фильтр PR-BW 400 с автоматической промывкой:

1 – фильтрующий элемент; 2 – клапан для удаления промывной воды; 3 – труба для отвода промывной воды; 4 – система измерения перепада давления

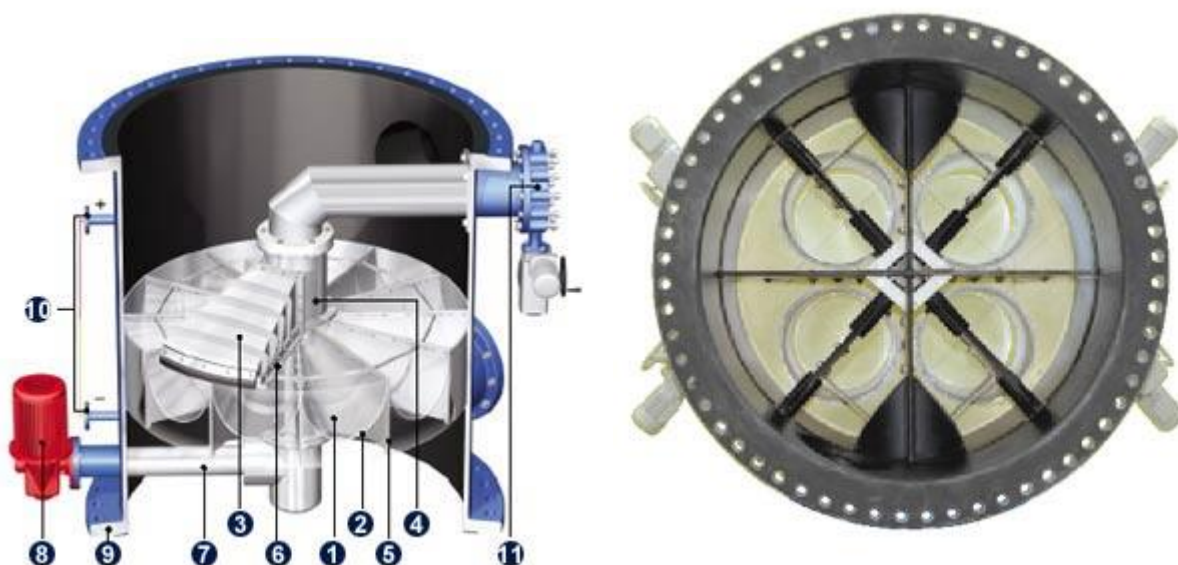


Рис. 2.33. Сетчатый фильтр PR-BW 800 с автоматической промывкой:

1 – камера фильтра; 2 – сегмент фильтровальной сетки; 3 – ротор для обратной промывки; 4 – труба для отвода промывной воды; 5 – поддерживающая пластина; 6 – вихревой индуктор; 7 – привод ротора; 8 – приводной мотор; 9 – корпус фильтра; 10 – система измерения перепада давления; 11 – клапан для удаления промывной воды

Дисковые фильтры – это попытка преодолеть основную проблему сетчатых фильтров – склонность к забиванию. Дисковый фильтр для воды при сжатии образует трехмерную сетчатую структуру (рис. 2.34), которая и служит основным фильтрующим элементом (картриджем). Корпус и внутренние элементы фильтра изготовлены из стойкого к коррозии материала. В его работе используются следующие технологические решения:

- очистка дисков происходит при автоматической смене направления потока воды;
- промывка осуществляется очищенной водой, получаемой от работающих в этот момент элементов системы;
- обратный поток подается под давлением, раздвигающим диски, в результате чего значительно ускоряется процесс промывки дисков;

- промывочная вода подается через систему форсунок, придающих дискам вращательное движение.

Время промывки одного картриджа составляет порядка 10-30 сек, а расход воды около 30 литров. Таким образом, из расчета на один фильтроэлемент, расход воды на собственные нужды составляет порядка 0,05 – 0,2 %

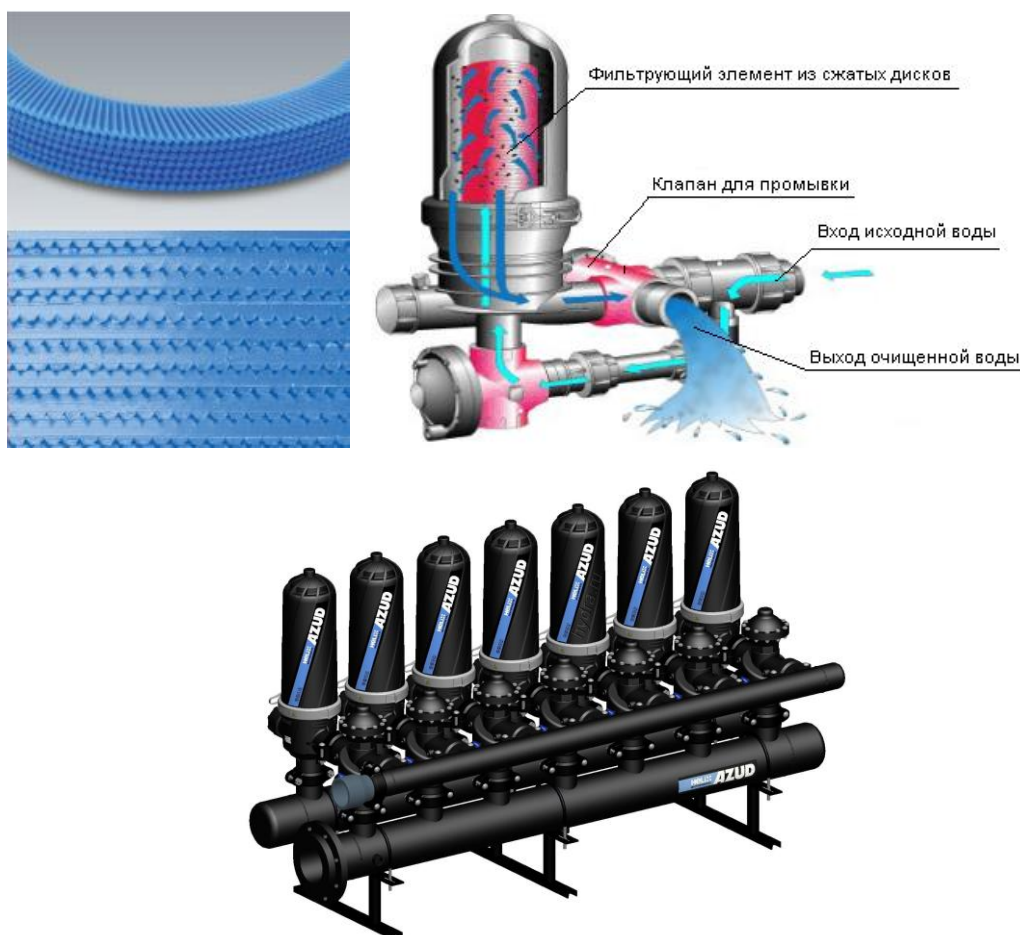


Рис. 2.34. Дисковый фильтр

Акустические сетчатые фильтры предназначены для предварительного осветления вод, содержащих высокодисперсные глинистые и другие взвеси крупностью более 20 мкм при содержании их в исходной воде до 6000 мг/л. Акустический фильтр представляет собой круглый (в плане) резервуар высотой 1,2-1,4 м, диаметром 0,4-0,6 м, состоящий из металлического корпуса, в котором расположены фильтрующий элемент (перфорированный стакан из

нержавеющей стали, с расположенными в шахматном порядке отверстиями диаметром 4-5 мм, обтянутый микросеткой с размером ячеек 100-125 мкм) и уплотнения. Скорость фильтрования – 80-150 м/ч, эффект осветления ~ 60%.

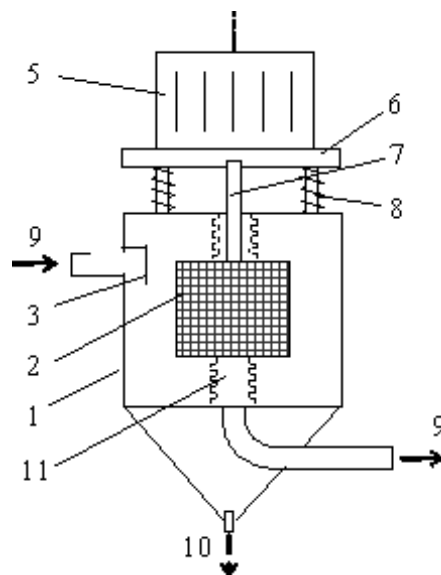


Рис. 2.35. Схема акустического фильтра:

1 - металлический корпус; 2 - фильтрующий элемент; 3 – водоотбойная пластина; 4 – подвод исходной воды; 5 – электромагнитный вибратор; 6 – опорная плита; 7 – шток; 8 – пружина; 9 – отвод осветленной воды; 10 – система оттарированных насадок; 11 – сифонные уплотнения

В результате создания упругих колебаний звукового диапазона частот электромагнитным вибратором в акустических фильтрах происходит непрерывная регенерация фильтрующего элемента. Расход воды со шламом составляет 3-5 % от полезной производительности акустического фильтра.

2.5. Удаление взвешенных веществ осажждением

2.5.1. Теоретические основы процесса осаждения взвеси

Сущность процесса осаждения заключается в выделении из воды взвешенных в ней примесей под действием силы тяжести. При уменьшении скорости движения обрабатываемой воды и ее турбулизации снижается транспортирующая способность потока и взвешенные в ней частицы, имеющие большую плотность, чем вода, декантируют.

При отстаивании скоагулированной взвеси происходит как свободное, так и «стесненное» осаждение частиц различной крупности и плотности. Эти частицы неоднородны по массе, форме и величине.

В общем виде закон сопротивления осаждаемой одиночной частицы в свободном объеме жидкости, описывается формулой Ньютона-Релея:

$$F_3 = \varphi_3 \cdot \rho_1 \cdot \Theta^2 \cdot d_r \quad (2.8)$$

где F_3 – сила сопротивления; φ_3 – коэффициент сопротивления, зависящий в свою очередь от числа Рейнольдса (Re).

$$Re = \rho_1 \cdot \Theta \cdot d / \eta, \quad (2.9)$$

где ρ_1 – плотность жидкости, η – вязкость жидкости, Θ – скорость осаждения частицы, d – диаметр частицы, принятый условно как диаметр равновеликого шара.

Допускается, что силы сопротивления F_3 и силы тяжести частиц G_r уравновешены при равномерном движении осажденных частиц: $F_3 = G_r$,

$$G_r = \frac{\pi d_r^3}{6} \cdot (\rho_2 - \rho_1) \cdot g, \quad (2.10)$$

где ρ_2 – плотность частицы взвеси, g – ускорение свободного падения.

Тогда коэффициент сопротивления одиночной частицы при ее свободном осаждении можно найти из формулы:

$$\varphi_3 = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \cdot g \cdot \frac{\pi d_r}{6\Theta^2}. \quad (2.11)$$

Более точное значение коэффициента сопротивления находят экспериментальным путем. При значении чисел $Re \ll 1$ в области (I) действия линейного закона сопротивления скорость осаждения мелких частиц с различной удельной поверхностью может быть найдена по формуле Стокса:

$$\Theta = \frac{d^2}{18} \cdot \frac{\rho_2 - \rho_1}{\eta} g \quad (2.12)$$

При $Re_r > 1$, характеризующихся скоростью осаждения более крупных и более плотных взвесей, значения таких скоростей в первом приближении могут быть определены по формуле:

$$\Theta = \frac{\pi d^3}{6\varphi^3} \cdot g \cdot \left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \right)^{0.5} \quad (2.13)$$

Поскольку большинство частиц, встречающихся в природных очищаемых водах (тем более, после их коагулирования), неоднородны, то характер их выпадения в объеме воды устанавливается с помощью кривых осаждения полидисперсной взвеси, которые получают в результате проведения

седиментационного анализа с помощью седиментометра Фигуровского, торсионных весов или обычных литровых цилиндров, в которых на определенной высоте отбираются через выделенные промежутки времени пробы воды для определения в них количества частиц.

Для моделирования процесса осаждения в отстойниках и расчета конструктивных элементов последних, используют понятие «процентной скорости выпадения взвеси» U в мм/с: $U = h / t$, где h – высота слоя воды, в котором происходит осаждение частиц, мм; t – время выпадения этих частиц.

Основой метода моделирования процесса осаждения монодисперсной взвеси, является подобие кривых выпадения взвеси при разных значениях высот осаждения.

$$\frac{t_n}{t_m} = \frac{h_n}{h_m} \quad (2.14)$$

где t_n, h_n – параметры натуры; t_m, h_m – параметры модели отстойника.

Однако, на практике, в случае предварительного коагулирования воды, приводящей к агрегативной и кинетической неустойчивости взвеси, условие подобия должно выражаться в виде:

$$\frac{t_n}{t_m} = \left(\frac{h_n}{h_m} \right)^n \quad (2.15)$$

где показатель степени $n < 1$ зависит от степени агломерации осаждаемых частиц. Его значения принимаются обычно в пределах от 0,2 (для мелких частиц) до 0,5 (для крупных, сформированных хлопьев).

Способность природных вод по своему физико-химическому составу и характеристикам примесей в них, к осветлению за счет осаждения А.А.Кастальский предложил оценивать для горизонтальных отстойников по

крайним значениям процентной скорости осаждения: $U_1 = 0,2$ мм/с; $U_2 = 1,2$ мм/с. При глубине отстойников ~ 4 метра, первый показатель отвечает времени пребывания воды в них равному 1 часу, второй – 6 часам. Соотношение этих величин U_1/U_2 принято называть показателем осаждаемости взвеси.

2.5.2. Типы, конструкции и расчет отстойников

Отстаивание воды производят в специальных сооружениях – отстойниках.

Отстойники классифицируют по: направлению движения воды (горизонтальные, вертикальные, радиальные, спиральные и тангенциальные); глубине отстаивания воды (с большой, обычно $H \geq 2,0$ м, и малой глубиной зоны осаждения ($H \leq 7-10$ см)).

Современные конструкции отстойников являются проточными, т.е. осаждение взвеси в них происходит при непрерывном движении воды от входа к выходу. Поэтому скорости движения жидкости в отстойниках малы: это десятые доли мм/с в вертикальных отстойниках и несколько мм/с в горизонтальных отстойниках.

Скорость выпадения частиц u при $t = 10$ °С называется гидравлической крупностью частицы.

Горизонтальный отстойник – прямоугольный, вытянутый в направлении движения воды резервуар, в котором осветляемая вода вдоль отстойника движется в направлении, близком к горизонтальному. Горизонтальные отстойники применяют на очистных станциях производительностью более 30000 м³/сут. Для повышения эффективности осветления горизонтальные отстойники оборудуются тонкослойными модулями.

Для равномерности распределения воды в поперечном сечении отстойника его объем делят в продольном направлении перегородками на самостоятельно действующие секции шириной 3-6 м. При числе отстойников менее шести следует предусматривать один резервный. Дно отстойника должно иметь

продольный уклон не менее 0,005 в направлении, обратном движению воды, а в поперечном направлении оно может быть плоским или призматическим с углом наклона граней 45°. Для удаления осадка без отключения отстойника из работы предусматривают гидравлические системы в виде перфорированных коробов или труб, которые обеспечивают его удаление в течение 20-30 мин. При открытой задвижке на сбросе осадок под действием гидростатического давления поступает в систему и в виде пульпы удаляется из отстойника.

Децентрализованный сбор осветленной воды, способствующий увеличению коэффициента объемного использования отстойника, осуществляют системой горизонтально расположенных желобов с затопленными отверстиями или треугольными водосливами, либо перфорированными трубами, расположенными на участке $\frac{2}{3}$ длины отстойника, считая от задней торцевой стенки. Расстояние в осях между водосборными трубами или желобами назначают до 3 м. При установке в отстойнике тонкослойных модулей подобную систему сбора воды устраивают на всю его длину.

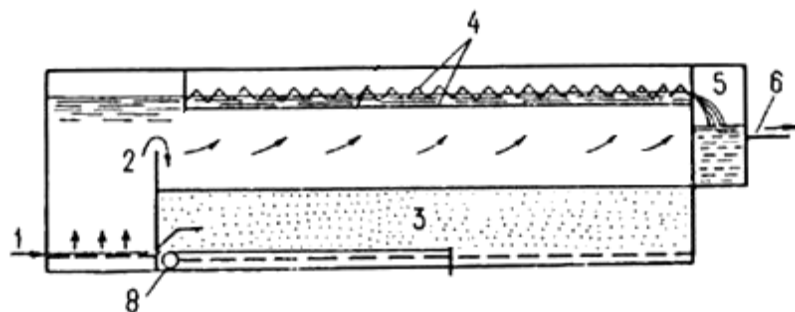


Рис. 2.36. Горизонтальный отстойник, оборудованный тонкослойными блоками:

1 – подача исходной воды; 2 – камера хлопьеобразования; 3 – зона накопления осадка; 4 -- сборные желоба; 5 – карман сбора осветленной воды; 6 – отвод осветленной воды; 7 – зона распределения воды; 8 – удаление осадка

Эффективность работы отстойников зависит от поступающих в него хлопьев, сформировавшихся в конце камеры хлопьеобразования. Если эти

хлопья будут разрушены по пути к отстойнику, то вторичная их агломерация в отстойнике будет идти медленно и отстойник будет плохо осветлять воду.

Во избежание разрушения хлопьев по пути к отстойнику камеру хлопьеобразования встраивают в начале. Размеры встроенных камер хлопьеобразования выбираются таким образом, чтобы время пребывания воды в них было в пределах 10-20 мин (меньшее время относится к мутным водам).

Система удаления осадка из зоны его накопления представляет собой дырчатые трубы, укладываемые по дну в лотках днища отстойника с уклоном в сторону, противоположную выходу осветленной воды. Расстояния между дырчатыми сборными трубами принимают не более 3 метров при призматических днищах отстойника и не более 1,5-2 метра – при плоских. В трубах для удаления осадка принимают отверстия диаметром не менее 25 мм, располагаемые шагом 0,3...0,5 м в шахматном порядке вниз под углом 45° к оси трубы. Отношение суммарной площади отверстий к площади сечения трубы должно быть равным 0,5...0,7.

В качестве механизированных средств удаления осадка без отключения отстойника применяют скребковые транспортеры, которые сгребают осадок в приямок, откачиваемым впоследствии эжектором или насосом. Из открытых горизонтальных отстойников больших площадей осадок можно удалять специальными плавучими землесосными снарядами. При движении такого снаряда по коридору отстойника напорный шланг снаряда попеременно присоединяется к патрубкам трубчатой системы, по которой осадок под напором, развиваемым насосом землесосного снаряда, перекачивается за пределы очистной станции.

Инженерный расчет отстойников производят на два случая: при минимальной мутности и при минимальном зимнем расходе обрабатываемой воды, а также при наибольшей мутности при наибольшем расходе воды, соответствующем этому периоду.

Суммарная площадь $F_{г.о}$ горизонтальных отстойников определяется по формуле:

$$F_{г.о} = \alpha_{об} \frac{q}{3,6 \cdot U_o}, \text{ м}^2 \quad (2.16)$$

где q – расчетный расход воды, $\text{м}^3/\text{ч}$; U_o – скорость выпадения взвеси, задерживаемой отстойником (гидравлическая крупность), $\text{мм}/\text{с}$, $\alpha_{об}$ – коэффициент объемного использования отстойников, принимаемый равным 1,3. Длина отстойника L определяется по формуле:

$$L = H_{cp} \cdot v_{cp} / U_o, \text{ м}, \quad (2.17)$$

где H_{cp} – средняя высота осаждения, принимаемая равной $3 \div 3,5$ м в зависимости от высотной схемы станции; v_{cp} – расчетная скорость горизонтального движения воды в начале отстойника, принимаемая равной $6 \div 8$, $7 \div 10$ и $9 \div 12$ $\text{мм}/\text{с}$ соответственно для вод маломутных, средней мутности и мутных.

Удаление осадка из отстойника рекомендуется производить гидравлическим способом по возможности без выключения отстойника из работы. Средняя концентрация взвешенных веществ в воде, поступающей в отстойник, ориентировочно определяется по формуле:

$$C_{cp} = M + k \cdot D_k + 0,25 \cdot Ц + B_{II}, \text{ мг}/\text{л}, \quad (2.18)$$

где M – мутность воды, $\text{мг}/\text{л}$; $Ц$ – цветность воды, град; k – коэффициент, для неочищенного сернокислого алюминия $k = 0,55$; D_k – доза коагулянта по $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$, $\text{мг}/\text{л}$; B_{II} – количество нерастворимых взвешенных веществ, вносимых с известью при подщелачивании, $\text{мг}/\text{л}$.

Объем зоны накопления и уплотнения осадка определяется по формуле:

$$W_{з.н} = \frac{24 \cdot q \cdot (C_{cp} - m) \cdot T}{N \cdot \delta}, \text{ м}^3, \quad (2.19)$$

где q – расчетный расход воды, $\text{м}^3/\text{ч}$; m – количество взвеси в воде на выходе из отстойника, принимаемое 8...12 мг/л; T – продолжительность работы отстойника между чистками, сут; N – число коридоров отстойника; δ – средняя концентрация уплотненного осадка, $\text{г}/\text{м}^3$.

Вертикальный отстойник – круглый в плане и в очень редких случаях квадратный резервуар значительной глубины, в котором обрабатываемая вода движется снизу вверх. Вертикальный отстойник имеет встроенную камеру хлопьеобразования водоворотного или вихревого типа в центральной трубе и конусное днище для накопления и уплотнения осадка. Угол между наклонными стенками, образующими днище, следует принимать 70-80°. Сбор осветленной воды предусматривается периферийным и радиальными желобами с затопленными отверстиями или с треугольными водосливами.

Осветление воды происходит при восходящем ее движении со скоростью 0,4-0,6 мм/с. Осадок из вертикальных отстойников выпускают под гидростатическим напором воды без выключения сооружения из работы. Вертикальные отстойники применяют при условии предварительного коагулирования воды, в основном, при расходах 3000-5000 $\text{м}^3/\text{сут}$.

Площадь зоны осаждения вертикального отстойника определяется по формуле:

$$F = \frac{\beta_{ос} \cdot q}{3,6 \cdot v_p \cdot N_p}, \text{ м}^2, \quad (2.20)$$

где q – расчетный расход воды, м³/ч; v_p – расчетная скорость восходящего потока; $v_p=0,08-0,6$ мм/с; принимается при отсутствии данных технологических изысканий не более указанных величин скоростей выпадения взвеси U_o ; N_p – количество рабочих отстойников; $\beta_{об}$ – коэффициент, учитывающий объемное использование отстойника, величина которого принимается $1,3\div 1,5$ (нижний предел – при отношении диаметра к высоте отстойника равном 1, верхний – при отношении равном 1,5).

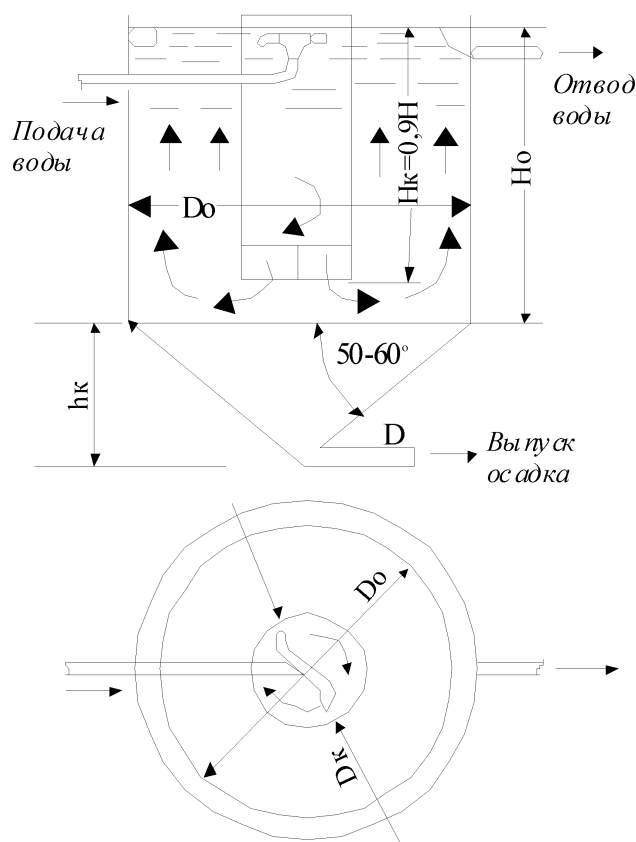


Рис. 2.37. Схема вертикального отстойника

При количестве отстойников менее 6 следует предусматривать 1 резервный.

Площадь камеры хлопьеобразования находится по формуле:

$$f_k = \frac{q \cdot t}{60 \cdot H_k \cdot N}, \text{ м}^2, \quad (2.21)$$

где t – время пребывания воды в камере (15 – 20 мин); H_k – высота камеры реакции, м; $H_k = 0,9 \cdot H_o$, где H_o – высота зоны осаждения вертикального отстойника ($H_o = 4 – 5$ м); N – число камер хлопьеобразования; $N = N_p$.

Разновидностью горизонтальных отстойников являются радиальные. Это круглые в плане железобетонные резервуары, высота которых невелика по сравнению с их диаметром. Осветляемая вода подводится снизу в центр и изливается через воронку, обращенную широким концом кверху. Вокруг воронки располагается цилиндр-успокоитель радиусом 1,5-2,5 м с глухим дном и с дырчатой стенкой. Наличие такого цилиндра способствует равномерному распределению воды по рабочей высоте отстойника. Вода медленно движется от центра к периферии и сливается в периферийный желоб с затопленными отверстиями или треугольными водосливами. Скорость движения воды в желобе принимают 0,5-0,6 м/с. Для удаления осадка используют медленно вращающуюся металлическую ферму с укрепленными на ней скребками, сгребающими осадок к центру отстойника, откуда он выпускается или откачивается.

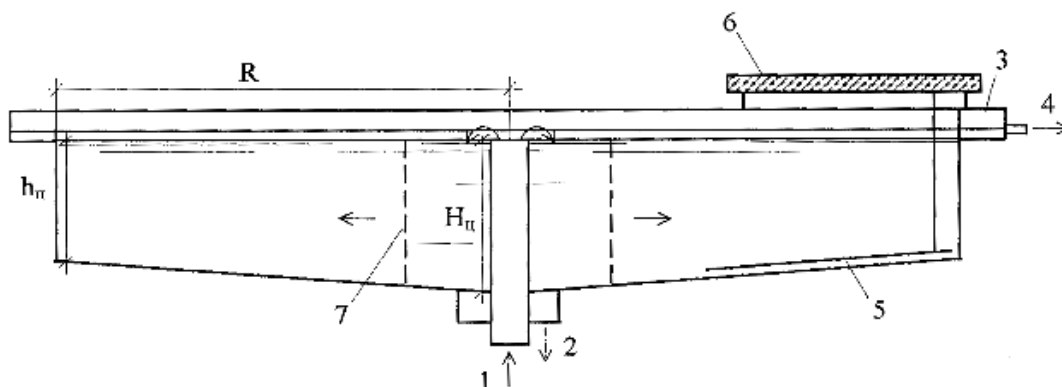


Рис. 2.38. Радиальный отстойник:

1 – центральная подающая труба; 2 – приемок для сбора и удаления осадка; 3 – сборный желоб для сбора осветленной воды; 4 – отвод осветленной воды; 5 – скребок; 6 – ферма; 7 – решетки центрального распределительного устройства

При проектировании радиальных отстойников задаются эффективностью осветления воды в нем по разнице концентраций взвешенных веществ: до ($C_{\text{вх}}$) и после ($C_{\text{вых}}$) отстойника:

$$\Xi = \frac{C_{\text{вх}} - C_{\text{вых}}}{C_{\text{вх}}} \cdot 100 \%. \quad (2.22)$$

Затем определяют требуемую их площадь по формуле:

$$F = 0,2 \cdot \left(\frac{q}{U_o} \right)^{1,07} + f, \text{ м}^2, \quad (2.23)$$

где q – расчетный расход воды, $\text{м}^3/\text{ч}$; U_o – скорость выпадения взвеси, принимаемая $0,5 \div 0,6$ $\text{мм}/\text{с}$; f – площадь вихревой зоны радиального отстойника, радиус которой на 1 м больше радиуса распределительного цилиндра, м^2 .

Среди методов интенсификации процесса осаждения примесей воды одним из наиболее перспективных является **отстаивание в тонком слое воды**, образуемом наклонными элементами, обеспечивающими быстрое выпадение взвеси и ее сползание по наклонной поверхности элементов в зону хлопьеобразования и осадкоуплотнения. Режим течения в отстойнике должен быть ламинарным. Производительность тонкослойных отстойников не ограничивается.

Типовые схемы размещения тонкослойных элементов с различным направлением движения осветляемой воды в них, сползания тяжелых и всплытие легких частиц осаждаемых примесей: противоточная, прямоточная и перекрестная представлены ниже.

В противоточной схеме вода и осадок движутся в противоположных направлениях (поток воды направляется вверх с определенной скоростью, а осадок сползает вниз). На входе в систему тонкослойных ячеек траектория

движения частицы определяется результатом сложения скорости восходящего потока и скорости оседания частицы.

В противоточной схеме с перекрестными потоками вода и осадок движутся перпендикулярно по отношению друг к другу (вода – в горизонтальном направлении, а осадок – в направлении сверху вниз).

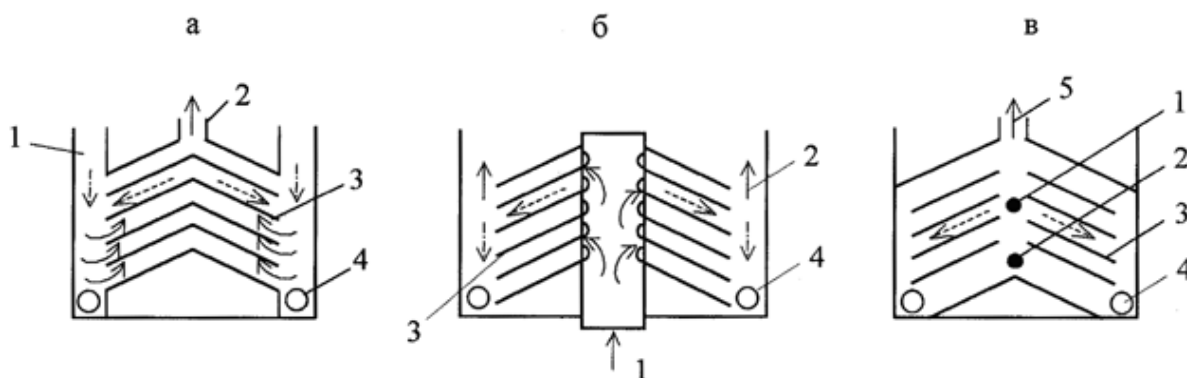


Рис. 2.39. Схемы тонкослойных отстойников:

а – противоточная, б – прямоточная, в – перекрестная;

1 – подача исходной воды; 2 – отвод осветленной воды; 3 – тонкослойные модули, 4 – трубопровод удаления осадка, 5 – отвод нефтепродуктов и взвеси с $\rho < 1 \text{ т/м}^3$

В прямоточной схеме вода и осадок движутся в одном направлении сверху вниз.

Противоточное отстаивание позволяет осуществить наиболее простую и вместе с тем наиболее надежную гидравлическую организацию процесса. В режиме прямоточного отстаивания возникают многочисленные трудности при отборе осветленной воды. Что же касается отстаивания с перекрестными потоками, то в этом случае равномерное распределение гидравлического потока является весьма сложной и трудноразрешимой проблемой.

Выбор типа модуля ячеек тонкослойного отстойника и, следовательно, эффективность тонкослойной системы определяется целым рядом параметров.

Конфигурация пластинчатых элементов должна благоприятствовать переходу от режима турбулентного истечения (на входе в ячейки) к

ламинарному (непосредственно в ячейках). Вследствие этого следует избегать применения таких систем крепления ячеек, которые требуют установки поперечных распорок, нарушающих нормальный процесс движения жидкости и отстаивания осадка.

В каждую ячейку должен поступать одинаковый объем воды. Это необходимо для предотвращения чрезмерного повышения скоростей потоков, которое может нарушить нормальный ход процесса отстаивания.

Расстояние между пластинчатыми элементами должно быть достаточным как для предотвращения забивания ячеек отстоявшимся осадком, так и для обеспечения возможности их чистки в случае необходимости.

Чем больше эквивалентная площадь отстаивания, тем более эффективным будет отстаивание (но не следует, однако, упускать из виду предшествующее замечание о расстоянии между пластинами).

На рис. 2.40 сравнивается эффективность нескольких типов тонкослойных модулей. В качестве параметра сравнения используется эквивалентная площадь отстаивания, при этом были сделаны следующие предположения относительно размеров модуля: гидравлический диаметр – 80 мм; наклон – 60°; длина пластинчатых элементов – 1,5 м.

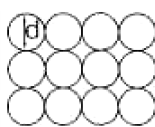
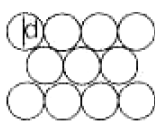
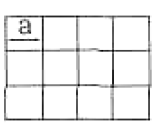
Тип тонко- слойного модуля отстойника	Без тонко- слойного модуля	Плоские пластины	Плоские пластины	Трубки круглого сечения, уложенные в ряд	Трубки круглого сечения, уложенные в шахматном порядке	Трубки квадратного сечения	Трубки шестигран- ного сечения
Эквивалент- ный гидрав- лический диаметр, мм	–	80 мм (40 мм между пла- сти- нами)	160 мм (80 мм между пла- сти- нами)	80 мм	80 мм	80 мм	80 мм
Конфи- гурация	–						
Эквивалент- ная площадь отстаивания	1	16,2	8,1	6,4	7,4	8,1	10,8

Рис. 2.40. Характеристики модулей тонкослойного отстаивания

Выбор типа тонкослойных модулей не должен производиться исходя лишь из максимально возможной эквивалентной площади отстаивания: модули с параллельными пластинами могут иметь значительную эквивалентную площадь отстаивания при условии сокращения расстояния между пластинами, что, однако, может привести к ненадежной работе отстойника (забивание ячеек) и даже вывести его из строя (невозможность прочистки пространства между пластинами).

Кроме того, установка пластинчатых элементов сама по себе является достаточно ответственной процедурой: она требует применения опор и поперечных распорок, т.е. приспособлений, которые часто нарушают гидравлические условия процесса отстаивания и являются причиной скопления осадка в ячейках.

Гидравлическая эффективность гексагональных модулей превышает эффективность как других трубчатых модулей, так и модулей с параллельными пластинами. В гексагональных модулях существенно снижается опасность забивания и вместе с тем обеспечивается исключительно большая эквивалентная площадь отстаивания.

Теоретическое обоснование процесса отстаивания воды в тонком слое базируется на гидравлических условиях устойчивости потока, описываемых критерием Фруда ($Fr_{кр}$):

$$Fr_{кр} = \frac{v_m^2}{g \cdot R}, \quad (2.24)$$

где v_m – максимальная скорость потока в канале тонкослойного отстойника.

При расчете тонкослойных отстойников исходят из соблюдения ламинарного режима течения и устойчивости потока в тонкослойном элементе при $Re = 60-80$ и гидравлической нагрузки, характеризуемой удельным

расходом, измеряемым в $\text{м}^3/\text{ч}\cdot\text{м}^2$, или скоростью потока в тонкослойных модулях, измеряемой в м/ч, которая устанавливается в результате технологических экспериментов. На практике значения последней при безреагентном отстаивании принимаются в пределах от 0,6-1,0 м/ч (для маломутных цветных вод) до 1,5-2,5 м/ч (для мутных вод). В качестве элементов могут быть использованы прямоугольные панели или трубки малого диаметра (7-10 см). Длину тонкослойных элементов изменяют обычно в пределах 0,6-1,5 метра, высоту поперечного сечения при прямоугольных панелях назначают в пределах 5-7 см. Для предотвращения накопления осадка в тонкослойных элементах и периодического или непрерывного сползания его в зону накопления угол наклона тонкослойных элементов принимают в пределах $45-60^\circ$. Из конструктивных соображений по монтажу и изготовлению блоков, состоящих из множества элементов, их размеры в плане принимают не более 1,5х1,5 м.



Рис. 2.41. Внешний вид тонкослойных модулей

Для формирования набора элементарных ячеек тонкослойного отстаивания имеются разнообразные по форме пластинчатые элементы: плоские или волнистые пластины, трубки круглого или квадратного сечения, шестигранные модули и др. (рис. 2.41).

Инженерный расчет тонкослойных отстойников заключается в определении размеров элементов отстойника при заданных гидравлических нагрузках, качестве исходной воды и требуемой степени очистки.

Передовые инженерные идеи объединились в отстойнике Densadeg, разработанном компанией Degremont: механическое перемешивание, рециркуляция осадка в камере хлопьеобразования, рециркуляция осадка из отстойника, тонкослойные модули, механическое удаление осадка. Отстойник имеет компактные размеры и позволяет обрабатывать воды в широком диапазоне мутности.

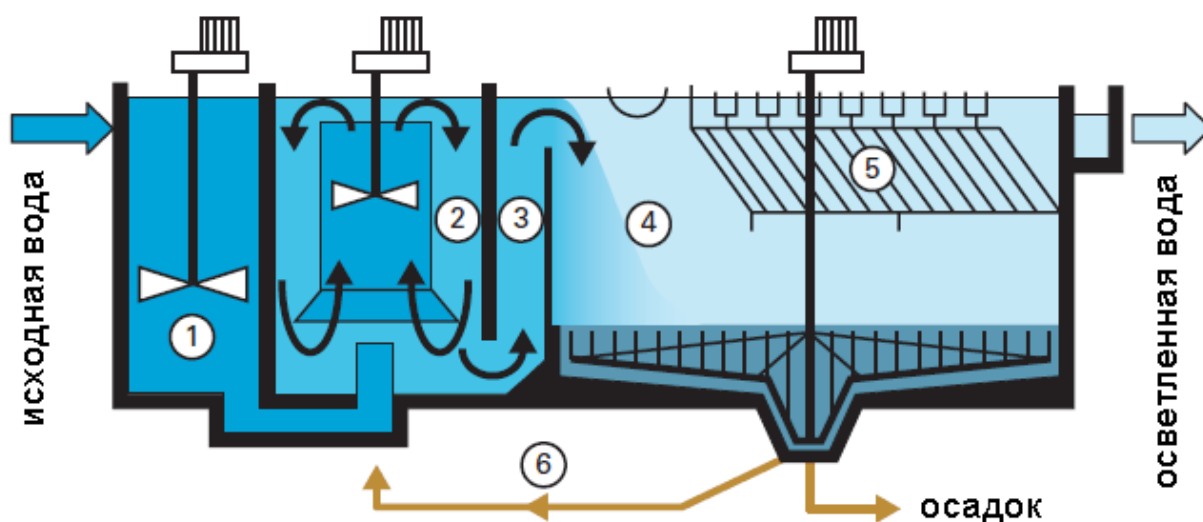


Рис. 2.42. Отстойник Densadeg:

1 – механический смеситель; 2 – механический флокулятор; 3 – промежуточный коридор; 4 – отстойник; 5 – тонкослойные модули; 6 – рециркуляция осадка

2.5.3. Обработка воды в слое взвешенного осадка

Метод обработки воды в слое ранее образованного взвешенного осадка широко используют в технологии ее осветления, обесцвечивания, умягчения, дефторирования, обезжелезивания и обескремнивания. Осветлители со слоем взвешенного осадка применяют на первой ступени водоподготовки вместо отстойников и камер хлопьеобразования. Они могут успешно работать только

при условии предварительной обработки примесей воды коагулянтom или флокулянтom. Эти сооружения обеспечивают более высокий эффект осветления воды (до 5-8 мг/л) и имеют более высокую производительность, чем отстойники. Однако конструктивно и в эксплуатации они более сложны.

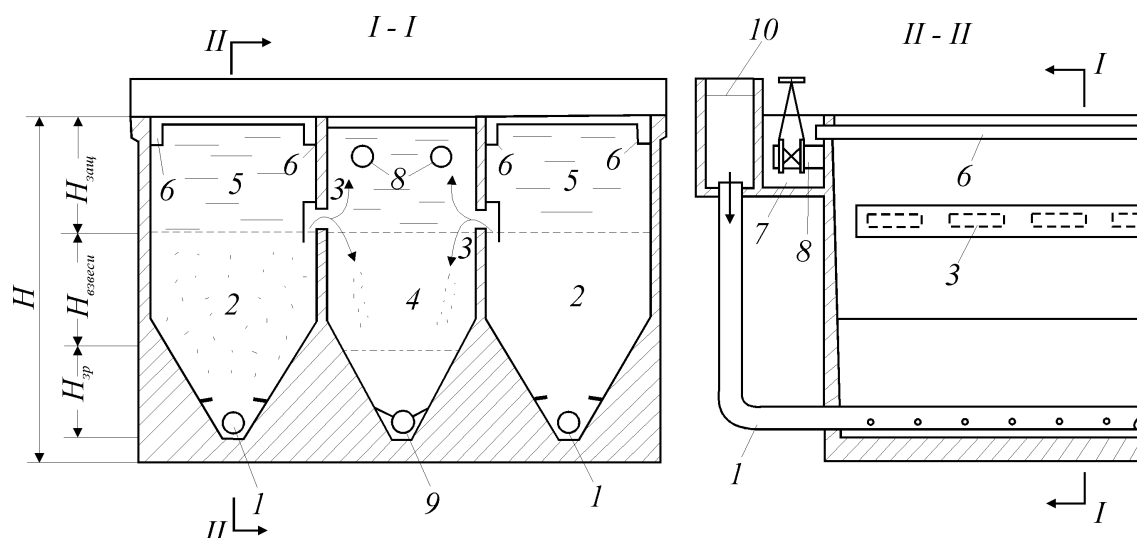


Рис. 2.43. Осветлитель коридорного типа:

1 – труба подачи исходной воды; 2 – коридоры-осветлители; 3 – окна для отвода осадка; 4 – осадкоуплотнитель; 5 – зона освещения; 6 – сборные желоба для отвода осветленной воды; 7 – канал осветленной воды; 8 – дырчатые трубы для сбора осветленной воды; 9 – дырчатые трубы отвода осадка; 10 – канал подачи исходной воды

Схема работы осветлителей со слоем взвешенного осадка показана на примере коридорного осветлителя на рис. 2.43. Обрабатываемая вода, смешанная с реагентами, вводится в осветлитель снизу и равномерно распределяется по площади рабочих коридоров. Далее вода движется снизу вверх и проходит через слой ранее образованного взвешенного осадка, состоящего из массы взвешенных в восходящем потоке хлопьев, которые непрерывно хаотично движутся, но весь слой в целом неподвижен. Он находится в состоянии динамического равновесия, обусловленного равенством скорости восходящего потока воды и средней скорости осаждения хлопьев. Необходимо отметить, что средняя скорость осаждения хлопьев во взвешенном

слое отлична от их гидравлической крупности. Это объясняется так называемым стесненным осаждением частиц, на котором основана работа осветлителей. Проходя через слой взвешенного осадка, обрабатываемая вода осветляется и обесцвечивается в результате контактной коагуляции.

При движении воды через взвешенный слой извлекаемые из нее примеси остаются в нем, при этом объем слоя должен непрерывно увеличиваться, но этого не происходит, так как избыточный осадок из взвешенного слоя непрерывно удаляется в осадкоуплотнитель, откуда сбрасывается на сооружения по обработке осадка. Обработанная вода, прошедшая через слой взвешенного осадка, собирается с помощью сборных желобов или труб и отводится за пределы аппарата, стабильная работа которого достигается при постоянстве расхода и температуры обрабатываемой воды, недопустимости попадания воздуха с водой. Спонтанные колебания расхода воды вызывают размыв взвешенного слоя и вынос хлопьев в зону осветления. Колебания температуры воды влекут за собой возникновение конвективных токов, приводящих к нарушению взвешенного слоя и замутнению осветленной воды. Для обеспечения нормальной работы осветлителя допускают в течение часа колебания расхода 15% и температуры обрабатываемой воды 1 °С.

При осаждении взвешенной массы хлопьев наблюдается стесненное осаждение. Его характерная особенность в том, что скорость осаждения, которая всегда меньше скорости свободного падения, т.е. гидравлической крупности частиц, зависит не только от их размеров и массы, но и от концентрации. Так, при объемной концентрации, равной 10%, скорость осаждения частиц в 2 раза меньше по сравнению с их гидравлической крупностью. Взвешенный в восходящем потоке слой хлопьев находится в состоянии стесненного осаждения, поэтому частицы не выносятся с потоком в зону осветления и не декантируют.

Благодаря тому, что скорость стесненного осаждения зависит от концентрации взвешенного слоя, он сохраняется в широком диапазоне

изменения скоростей восходящего потока. Каждому значению восходящей скорости потока отвечает определенная в данных условиях концентрация частиц слоя. Скорость свободного осаждения частиц является верхним пределом существования взвешенного слоя. Когда скорость потока приближается к этой величине, слой размывается. Нижний предел существования слоя – минимальная скорость потока, при которой силы гидродинамического воздействия потока на частицы меньше их силы тяжести. В этом случае частицы плотной массы декантируют. Скорость восходящего потока в осветителях лежит между этими пределами.

В основу физико-химической сущности задержания взвеси разной дисперсности и устойчивости во взвешенном слое осадка лежат процессы, характерные для контактной коагуляции. Степень извлечения загрязнений зависит от площади поверхности твердой фазы в единице объема контактной среды и соотношения скорости диффузии частиц загрязнений, сил адгезии и отрыва, времени контакта пребывания частиц в этой среде. В ней изменение концентрации примесей в очищаемой воде (C) за промежуток времени (t) может быть выражено дифференциальным уравнением:

$$\frac{dc}{dt} = -\epsilon C_o C^*, \quad (2.25)$$

где ϵ – параметр, характеризующий интенсивность контактной коагуляции частиц. После преобразования получают формулу для определения эффективности очистки:

$$\frac{C_{ex}}{C_o} = e^{-\epsilon \frac{C^*}{v} x}. \quad (2.26)$$

Для неоднородной по физико-химическим свойствам взвеси и произвольного поперечного сечения взвешенного слоя эффективность очистки воды в осветлителе может быть описана уравнением:

$$\frac{C_1}{C_o} = \delta_1 e^{-\epsilon_1 x'} + \delta_2 e^{-\epsilon_2 x'} + \dots + \delta_n e^{-\epsilon_n x'}, \quad (2.27)$$

где $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ – относительное содержание каждой из фракций примесей, присутствующих в воде; C_o – их суммарная концентрация; C_1 – суммарная концентрация всех мелких фракций, изменяющихся в процессе осветления;

$x' = \frac{C_x}{v} x$ – обобщенная характеристика качества обрабатываемой воды.

Осветлители классифицируют по:

- способу удаления избытка осадка (с гравитационным и принудительным отводом осадка);
- месту расположения осадкоуплотнителей (с поддонным; с выносным, вертикальным; с размещением осадкоуплотнителя в конусной части блока осветления воды);
- рабочему давлению (открытые и напорные).

Некоторые из конструкций осветлителей рассмотрены ниже. Принцип работы классического осветлителя с коническим диффузором на примере осветлителя конструкции Е.Н.Тетеркина (рис. 2.44) заключается в следующем.

Вода, смешенная с растворами реагентов, поступает в осветлитель из воздухоотделителя по трубопроводу в нижнюю часть конуса диффузора. При движении воды снизу вверх скорость потока уменьшается до величины, при которой в диффузоре образуется слой взвешенного осадка. По мере накопления осадка его избыток переливается через кромку диффузора и опускается в осадкоуплотнитель. Осветленная вода проходит через защитный слой воды над диффузором и по сборному желобу отводится на фильтры. Осадок через

дырчатую трубу непрерывно или периодически по сбросному трубопроводу отводится в канализацию.

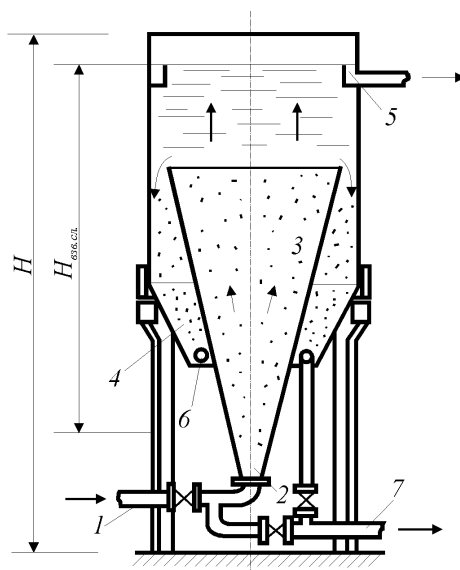


Рис. 2.44. Осветлитель со взвешенным осадком конструкции Е.Н. Тетеркина:

1 – трубопровод; 2 – диффузор; 3 – слой взвешенного осадка; 4 – осадкоуплотнитель; 5 – сборный желоб; 6 – дырчатая труба; 7 – трубопровод отвода осадка

Осветлитель коридорного типа с вертикальным осадкоуплотнителем прямоугольный в плане состоит из трех параллельных коридоров. Вода, прошедшая воздухоотделитель, по дырчатым распределительным трубам распределяется по длине коридоров-осветлителей. Избыток осадка с частью воды через осадкоотводные окна поступает в осадкоуплотнитель. За счет отвода части воды в осадкоуплотнитель снижается скорость восходящего потока воды выше слоя взвешенного осадка в зоне освещения, что обеспечивает необходимый эффект осветления воды. Осветленная вода через сборные желоба поступает в канал. Из осадкоуплотнителя осветленная вода отводится в тот же канал через дырчатые трубы, установленные на 300 мм ниже поверхности воды в нем. Уплотненный осадок из осадкоуплотнителя сбрасывается в сток через дырчатые трубы, уложенные в нижней части дна осадкоуплотнителя.

В зарубежной практике водоподготовки находят применение «пульсаторы» – осветлители, в которых слой осадка во взвешенном состоянии и предотвращение его завалов в нижней части зон осветления, осуществляют путем пульсирующей подачи осветляемой воды под слой взвешенного осадка с помощью специальной вакуумной камеры и системы гашения восходящего потока. Пульсирующие циклы поступления воды в зону осветления повторяются периодически и зависят от принятой расчетной схемы управления. Удельные гидравлические нагрузки по обрабатываемой воде на таких «пульсаторах» примерно такие же, как для осветлителей без пульсации восходящих потоков.

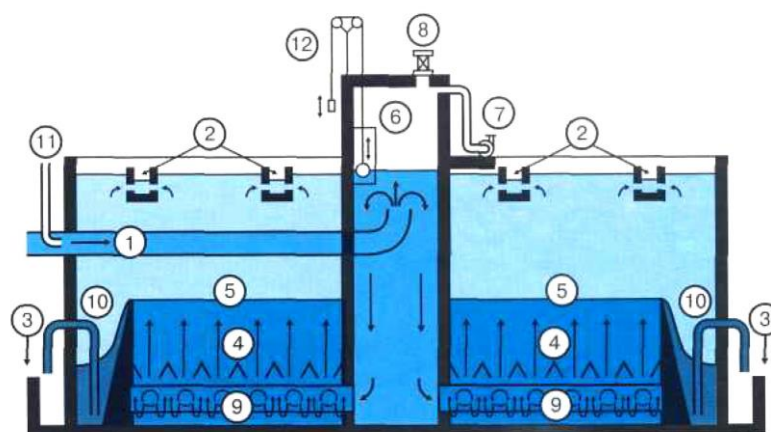


Рис. 2.45. Осветлитель Sedipac FD:

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

Осветлитель **Pulsator** (рис. 2.45), разработанный более 60 лет тому назад, до сих пор остается наиболее часто применяемым при обработке природных вод. Такой успех обусловлен следующими его преимуществами:

- простота конструкции и адаптируемость к резервуарам любой формы;
- более высокая скорость Хазена по сравнению с таковой в статических осветлителях: при осветлении природных вод она достигает 2-4 м/ч (при

благоприятных значениях коэффициента когезии осадка этот показатель может быть еще выше); данное преимущество в сочетании с отсутствием отдельного флокулятора (зоны флокуляции и отстаивания в описываемом отстойнике совмещены) обеспечивает возможность создания исключительно компактных сооружений;

- эксплуатационная гибкость: быстрота запуска, незначительное влияние изменений расхода и/или качества обрабатываемой воды (инерционность слоя осадка);

- высокая надежность, обуславливаемая в первую очередь тем, что в осветлителе нет механического оборудования (устройств перемешивания, скребковых механизмов и т. п.), погруженного в воду или в осадок;

- низкие эксплуатационные расходы (малое потребление электроэнергии, оптимизация расхода реагентов и т. п.).

Собственно осветлитель (рис. 2.45) состоит из резервуара с плоским дном, в нижней его части размещена система перфорированных труб (9), над которыми установлены гасители напора (4); такая схема обеспечивает равномерную подачу воды по всему поперечному сечению аппарата (в плане). Другая система, образованная в верхней части аппарата перфорированными трубами или лотками (2), обеспечивает равномерный отбор осветленной воды. Подобная система подачи и распределения исходной воды позволяет поддерживать равномерный ее поток во всех зонах слоя взвешенного осадка и предотвращает опасность возникновения застойных участков.

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

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

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

В результате пульсаций слою осадка сообщается возвратно-поступательное движение в вертикальной плоскости, приводящее к увеличению его объема за счет сфлуктуируемых взвешенных веществ, содержащихся в исходной воде и захваченных массой существующего осадка. Для поддержания постоянного уровня осадка (5) в осветлителе предусмотрены боковые зоны (10) в виде углублений с наклонным дном, в которые переливается избыток осадка для уплотнения и последующего извлечения. Удаление уплотненного осадка производится периодически (реле времени) по отводным трубам (3). Важное преимущество такой конструкции состоит в том, что в случае удаления слишком большого количества осадка происходящая при этом определенная потеря воды никоим образом не оказывает влияния на сформировавшийся слой осадка.

Осветлитель Pulsator легко монтируется в уже существующем резервуаре (от обычного отстойника, бывшего фильтра и т. п.). Это позволяет выполнять реконструкцию имеющихся сооружений, увеличивая примерно в 2-3 раза производительность сооружения.

Сочетать технологию отстаивания в контакте с осадком с тонкослойным освещением можно двумя способами:

- добавив тонкослойные модули в зону осветленной воды; соответствующий аппарат носит название Pulsatube (или Pulsator T);
- установив наклонные пластины непосредственно в слое осадка: такой аппарат называется Superpulsator (или Pulsator S).

Одновременно оба подхода компания «Дегремон» реализовала в осветлителе **Ultrapulsator** (или **Pulsator U**); на рис. 2.46 схематически представлена эволюция этого семейства осветлителей.

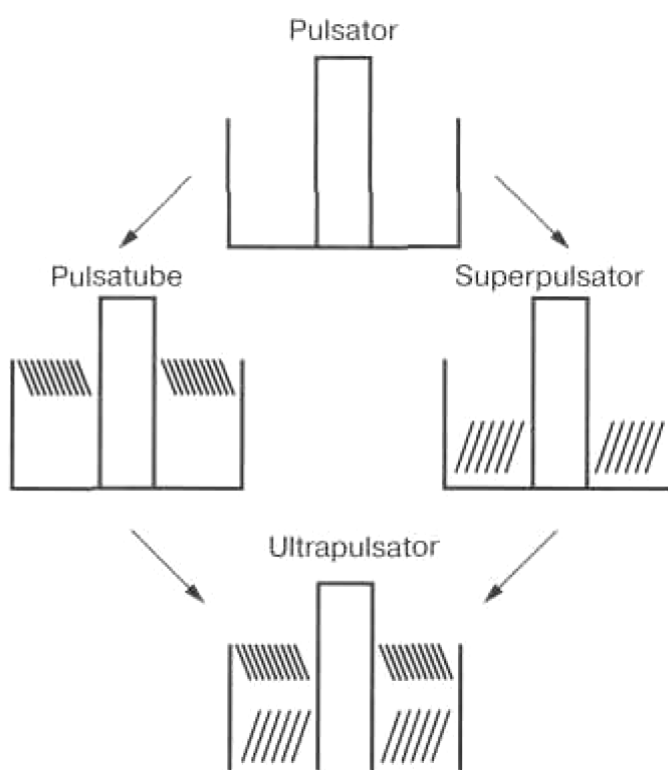


Рис. 2.46. Эволюция осветлителей с пульсирующим слоем осадка

В таких осветлителях объединены все преимущества соответствующих технологий: освещение в контакте с осадком, пульсация слоя осадка и тонкослойное освещение (влияние на скорость Хазена и процесс уплотнения слоя осадка). Они имеют ряд общих элементов (подвод и распределение

исходной воды, отвод осветленной воды) с осветлителем Pulsator и превосходят его по важным техническим параметрам (допустимая скорость, качество осветленной воды и т. п.), сохраняя при этом присущие осветлителю Pulsator компактность, гибкость в эксплуатации и надежность.

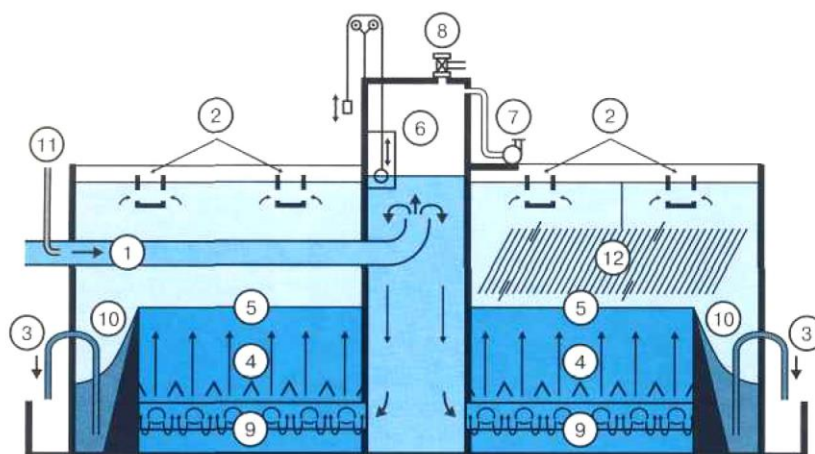


Рис. 2.47. Условная схема, показывающая разницу между осветлителями Pulsator (слева) и Pulsatube (справа):

1. Подача исходной воды; 2. Отвод осветленной воды; 3. Удаление осадка; 4. Гасители напора; 5. Верхний уровень слоя осадка; 6. Камера разрежения; 7. Вакуумный насос или вентилятор; 8. Автоматический клапан сброса разрежения; 9. Перфорированные трубы распределения исходной воды; 10. Уплотнители осадка; 11. Введение реагентов; 12. Тонкослойные модули



Рис. 2.48. Шесть осветителей Pulsatube на станции питьевой воды «Selangor», Малайзия.

Производительность 1 040 000 м³/сут.

На рис. 2.47 представлена принципиальная схема осветителя Pulsatube (см. также рис. 2.48), из которой можно понять следующее:

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

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

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

В осветителе **Superpulsator** (рис. 2.49) применяется принцип флокуляции-отстаивания, реализуемый в условиях совместного действия наклонных пластин и слоя осадка. Пластины, погруженные в слой осадка, способствуют хорошему распределению воды, так что необходимость в гасителях напора потока вводимой воды, как правило, отпадает.

В осветителе Superpulsator используются два явления, имеющих место одновременно:

- в процессе флокуляции вода поступает в систему параллельных пластин, установленных под углом 60° к горизонти. Нижняя поверхность каждой пластины оснащена отражателями, которые создают вихревые потоки, способствующие процессу флокуляции;

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

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

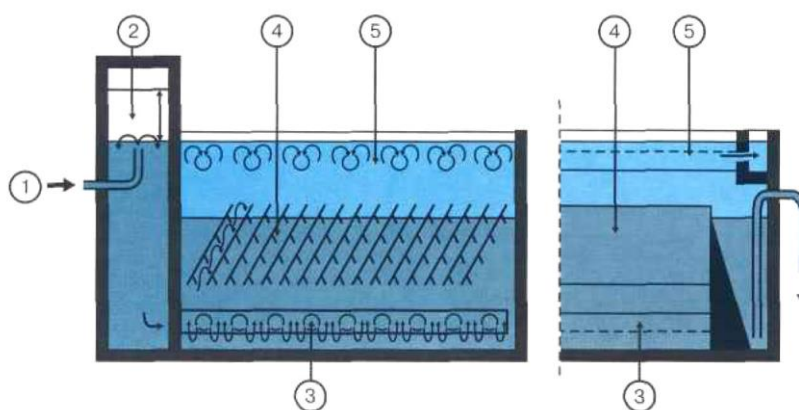


Рис. 2.49. Осветлитель Superpulsator в разрезе:

1. Подача исходной воды; 2. Камера разрежения; 3. Сеть распределения исходной воды; 4. Система пластин с отражателями; 5. Система отвода осветленной воды.

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

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

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

- для обеспечения простоты эксплуатации сооружения при минимальной занимаемой площади;
- при решении особых проблем обработки природных вод (например, маломутных высокоцветных вод с низкой температурой, что характерно для Канады, северных штатов США и России; на стадии предварительной обработки перед мембранами ультрафильтрации).

Описанные выше осветлители со слоем осадка способны осуществлять осветление любой природной воды, мутность которой не превышает 1500 мг/л, а также прекрасно справляются с удалением фитопланктона (при его содержании до нескольких сотен тысяч единиц на 1 мл) и снижением цветности.

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

Осветлители всего семейства **Pulsator** благодаря их многочисленным преимуществам работают в настоящее время в составе водопроводных станций, снабжающих питьевой водой примерно **полмиллиарда потребителей** в населенных пунктах по всему миру.

Важным фактором, обуславливающим нормальную работу осветлителей со взвешенным осадком, является предотвращение в процессе их работы завалов и препятствий для периодического удаления осадка из зоны их накопления и уплотнения. Эффект осветления воды по мутности зависит также от равномерности распределения воды по площади зоны осветления, достаточности высоты слоя взвешенного осадка и слоя воды ($\geq 0,4 - 0,5$ м) над верхней границей взвешенного слоя. Для обеспечения оптимальных режимов управления работой осветлителей при изменяющемся качестве расходов поступающих на станцию водоочистки воды каждый из осветлителей должен быть оснащен средствами автоматики и КИП.

Сущность технологического расчета осветлителей со взвешенным осадком заключается в нахождении оптимального соотношения скорости восходящего потока и гидравлической крупности взвеси (V/U) в различные периоды года и его связи с весовой концентрацией осадка ($C_{об}$). Это соотношение, как уже отмечалось ранее, определяет эффективность осветления воды, выраженную через величину C_{ex}/C_o и высоту слоя взвешенного осадка. Расчет осветлителей выполняют на два случая: минимальной мутности при минимальном зимнем расходе воды и максимальной мутности при наибольшем максимальном расходе воды.

Высоту зоны осветления воды над слоем осадка назначают из гидродинамических условий его функционирования $h_{з.о.} = f(v, x)$. Обобщенные значения рекомендуемых скоростей восходящего потока воды в осветлителях различных конструкций, в зависимости от физико-химических свойств обработанной предварительно растворами коагулянта $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ и флокулянта (ПАА) воды и взвеси.

Общую площадь осветлителя определяют по формуле:

$$F = F_{осв} + F_{отд}, \quad (2.28)$$

где $F_{осв}$ – площадь зоны осветления, м²; $F_{отд}$ – площадь зоны отделения осадка, м². Площадь одного осветлителя коридорного типа в плане не должна превышать 100-150 м². В зависимости от этого принимается расчетное количество осветлителей.

$$F_{осв} = \frac{qK_{p.в}}{3,6v_{осв}}, м^2; F_{отд} = \frac{q(1-K_{p.в})}{3,6v_{осв}}, \quad (2.29)$$

где $K_{p.в}$ – коэффициент распределения воды между зонами осветления и отделения осадка. Ширину коридоров B_k принимают в соответствии с шагом балок длины: 3 и 6 м.

Объем зоны накопления осадка определяется по формуле:

$$W_{з.у} = \frac{q \cdot T \cdot (C_o - M_{осв})}{N \cdot \delta_{ср}}, \quad (2.30)$$

где q – часовой расход воды, м³/ч; T – время уплотнения осадка, час (принимается в пределах 2-6 ч); C_o – содержание взвешенных веществ, поступающих с водой в осветлитель, мг/л; $M_{осв}$ – содержание взвешенных веществ в воде, выходящей после осветлителя, принимается равной 8-15 мг/л; $\delta_{ср}$ – средняя концентрация осадка в осадкоуплотнителе, мг/л.

Удаление осадка следует производить без остановки осветлителя с помощью дырчатых труб, расположенных по продольной оси дна осадкоуплотнителя. Расчетом также определяют расход, пропускаемый через каждую осадкосбросную трубу и ее диаметр, и количество отверстий при их диаметре не менее 20 мм, расстоянии между ними – 300-500 мм.

Относительный расход сбрасываемой с осадком воды (в % от общего расхода) определяется по формуле:

$$P = \frac{K_p \cdot W_{з.у}}{24 \cdot q \cdot T} \cdot 100, \% \quad (2.31)$$

где K_p – коэффициент разбавления осадка, принимаемый равным 1,2-2,5.

Подача воды в осветлитель осуществляется с помощью телескопического дырчатого коллектора, диаметр которого определяется исходя из расхода в одном коридоре осветлителя и скорости движения воды на входе в коллектор (равный 0,5-0,6 м/с). Отверстия в коллекторе принимаются не менее 15-25 мм и располагаются в нижней части трубы под углом 45°. Скорость выхода воды из отверстий 1,5-2 м/с. Сбор осветленной воды в коридорах осветлителя осуществляется водосборными желобами или дырчатыми трубами с затопленными отверстиями. Расход воды в одном желобе определяется по формуле:

$$q_{oc} = \frac{(1-K) \cdot q}{2 \cdot N}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (2.32)$$

где $K = 0,6-0,8$ – коэффициент распределения воды между зоной осветления и осадкоуплотнителем, N – число желобов в коридоре осветлителя ($N = 2$).

Полная высота осветлителя определяется по формуле:

$$H_{осв} = h_{нур} + h_{верт} + h_{дон}, \text{ м}, \quad (2.33)$$

Интенсификация работы осветлителей, повышение эффективности очистки воды в них и стабилизация режимов водообработки в межпродувочные периоды достигается следующими основными приемами:

- оборудованием каждого осветлителя воздухоотделителем и регулятором скорости восходящего потока;

- устройством зон смешения воды с реагентами и камер хлопьеобразования непосредственно в корпусах осветлителей;
- упрочением хлопьев образующегося осадка за счет эжекторных устройств перед воздухоотделителями для отдувки воздухом избыточной углекислоты CO_2 , выделяющейся при введении в воду коагулянта;
- рециркуляцией части осадка в зоне действия взвешенного слоя;
- устройством в зонах осветления тонкослойных модулей и префильтров с крупногранульной плавающей загрузкой.

2.6. Удаление грубодисперсных примесей в поле центробежных сил

2.6.1. Осаждение в поле центробежных сил. Гидроциклоны

Для осветления воды, содержащей грубодисперсные примеси (ГДП), все более широкое применение получают *центрифуги* и *гидроциклоны* (рис. 2.50). Их действие основано на использовании поля центробежных сил, где выделение механических примесей из воды происходит под воздействием этих сил, которые в сотни и тысячи раз превышают силы тяжести, за счет чего увеличивается скорость осаждения частиц. При этом эквивалентно сокращается продолжительность процесса осветления воды и значительно уменьшается необходимый объем центробежного аппарата по сравнению с объемом отстойника. Режим движения жидкости в поле центробежных сил – турбулентный. Передача вращения от периферии внутрь происходит диффузией и конвекцией под действием вращающего момента сил, вязкости и перемещения самой завихренной жидкости. При этом возникают два основных круговых потока: внешний, направленный, к вершине образующегося конуса, и внутренний, направленный в противоположную сторону. При вращении внешнего потока часть жидкости удаляется через нижнее отводное отверстие, а

другая часть отделяется, и, двигаясь радиально, вливается во внутренний поток, к нему добавляется основное количество жидкости у вершины конуса и, изменяя направление, отводится через верхнее отводное отверстие в диафрагме аппарата. В гидроциклоне кроме внешнего и внутреннего вращающихся потоков жидкости образуется третий – воздушный поток (воздушный столб) по оси аппарата. Потоки жидкости направлены по логарифмической спирали. Внешний поток ограничен стенкой аппарата и поверхностью внутреннего потока, который, в свою очередь, ограничен с внутренней стороны воздушным столбом.

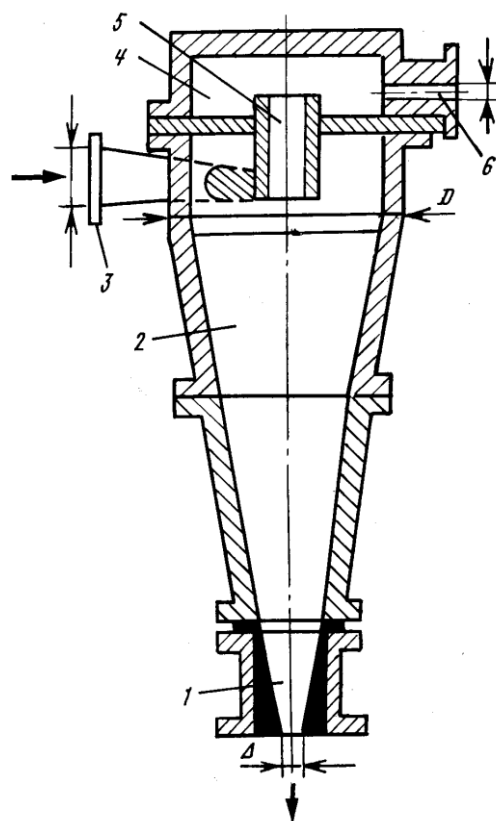


Рис. 2.50. Схема одноярусного напорного гидроциклона:

1 – сменная насадка для выпуска осадка; 2 и 4 – коническая и цилиндрическая часть; 3, 5 – питающий и сливной патрубки, 6 – отвод осветленной воды

Осветление воды в поле центробежных сил при вращении воды в аппарате основано на переносе частиц взвеси к периферии центробежной силой, равной разности значений центробежной силы для твердой и жидкой фаз. Эта сила P ,

возникающая при тангенциальном впуске воды в аппарат под некоторым давлением, равна

$$P = \frac{\pi d^2 (\rho_m - \rho_{ж})}{6} \cdot \frac{v^2}{R}, \quad (2.34)$$

где d – эквивалентный диаметр частиц взвеси, см; ρ_m и $\rho_{ж}$ – плотность твердой и жидкой фазы в осветляемой воде, г/см³; v – скорость движения воды на входе в аппарат, см/с; R – расстояние от центра аппарата до оси тангенциального питающего патрубка, см.

При больших значениях u и малых величинах R сила, действующая на частицу взвеси во вращающемся потоке жидкости, будет во много раз больше силы тяжести и скорость движения частиц взвеси будет значительно больше скорости свободного их осаждения. Поэтому в поле центробежных сил выделение взвеси из воды осуществляется значительно быстрее, чем в отстойниках.

Многочисленными исследованиями установлена эффективность осветления воды в проточных центрифугах и гидроциклонах. Однако высокая стоимость проточных центрифуг и сложность эксплуатации делают их не конкурентоспособными в сравнении с гидроциклонами. Вместе с тем, результаты исследований Г.А. Илясова показали целесообразность и эффективность применения центрифуг с подложкой для извлечения из воды планктона и ГДП.

Гидроциклоны могут быть открытыми и напорными. Открытые гидроциклоны устраивают одно- и многоярусными. В основу проектирования и расчета многоярусных гидроциклонов принимается формула для определения гидравлической крупности частиц u , на задержание которых рассчитывают аппарат:

$$u = \frac{qD^2}{3,6(D^2 - d^2)} \quad (2.35)$$

где q – гидравлическая нагрузка, приходящаяся на один ярус гидроциклона, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$; D и d – соответственно диаметры гидроциклона и шламосадерживающего козырька, м.

Напорные гидроциклоны бывают обычными и мультициклонами. Изготавливают гидроциклоны двух видов: литые нефутерованные диаметром от 75 до 500 мм и футерованные каменным литьем или шлакоситаллом диаметром от 150 до 2000 мм. Угол конусности гидроциклонов составляет 20 град. В них обеспечивается извлечение из воды минеральных примесей размером более 0,1...0,15 мм плотностью не менее 1,2 г/см³.

Обрабатываемая вода подводится в верхнюю часть гидроциклона тангенциально и, вращаясь, движется к сливному патрубку, расположенному в центре по оси аппарата. Центробежной силой диспергированные примеси воды перемещаются к стенкам гидроциклона и по ним спускаются вниз, в конус, через насадку в нижней части которого они непрерывно удаляются в сток. Перемещение твердых частиц к стенкам аппарата происходит со скоростью, равной разности между значением скорости, возникающей в результате действия центробежных сил, и радиальной скорости движения, направленной к центру.

Подачу гидроциклона по осветленной воде q определяют по формуле

$$q = 864\alpha \frac{d}{d_n} \alpha (2g\Delta H)^{0,5} \quad (2.36)$$

где α – коэффициент, учитывающий потерю части воды с осадком, равным 0,85...0,9 (большее значение для меньшего диаметра насадки); a – площадь живого сечения питающего отверстия, м^2 ; α – диаметр сливного патрубка, см;

d_n – эквивалентный диаметр питающего отверстия (диаметр круга, равновеликого площади питающего отверстия); см; g – ускорение свободного падения; ΔH – потеря напора в гидроциклоне, м.

Потери напора в гидроциклоне зависят от его конструкции и подачи. С возрастанием расхода воды через аппарат в нем увеличивается скорость движения воды, адекватно этому возрастает и эффект осветления воды, одновременно растут и потери напора в гидроциклоне.

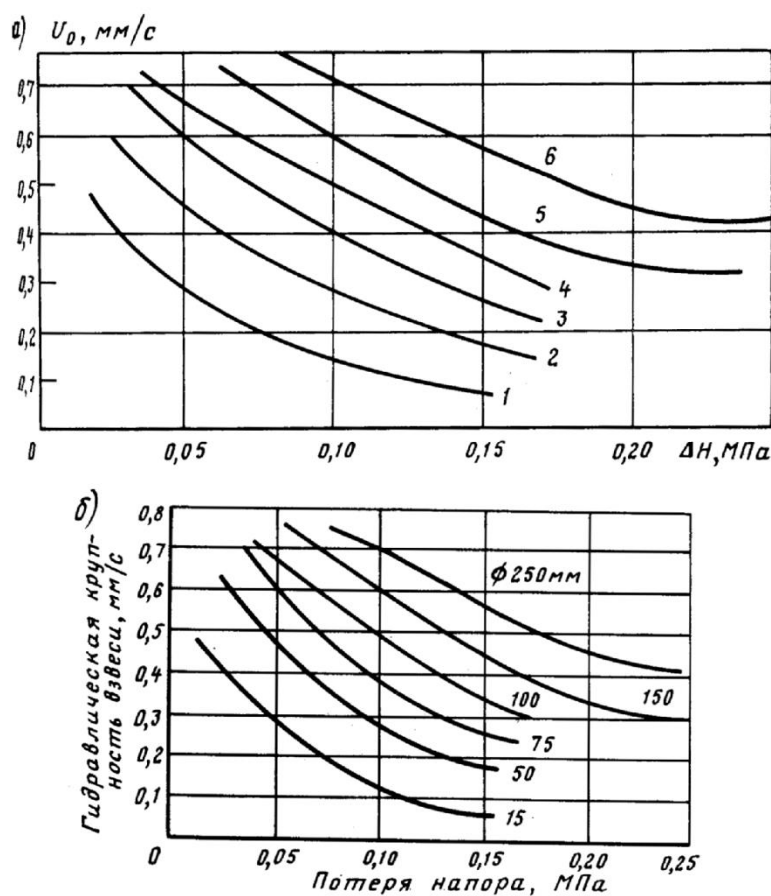


Рис. 2.51. Графики для определения диаметра гидроциклона и потерь напора в нем (а) и его эффективности от потери напора (б)

Чем меньше диаметр гидроциклона, тем выше (при равном напоре) эффект осветления воды (рис. 2.51). Поэтому для обработки вод, содержащих тонкодисперсную взвесь, следует использовать аппараты малого диаметра.

К достоинствам гидроциклонов следует отнести: компактность, простоту устройства и отсутствие движущихся частей; высокую объемную производительность; большую скорость и высокую эффективность разделения суспензий; простоту обслуживания; быстроту пуска и выключения из работы; возможность разнообразного использования без затраты дополнительной площади; возможность соблюдения санитарных условий труда; непрерывность процесса и возможность автоматизации. Недостатками гидроциклонов являются: быстрый износ, особенно при обработке твердых материалов; колебания эффекта осветления в зависимости от состава и содержания взвешенных веществ в исходной воде; не всегда возможно полное выделение частиц заданного размера, поскольку гидроциклон действует как пропорциональный разделитель.

Чем меньше диаметр гидроциклона, тем больше развивающиеся в нем центробежные силы и тем меньше размер задерживаемых в гидроциклоне частиц. Большая эффективность разделения достигается в гидроциклоне вытянутой формы с возможно малым углом конусности. Поэтому для задержания тонкодисперсной взвеси используют гидроциклоны малого диаметра, устанавливая их параллельно в большом количестве. Такой аппарат называют мультициклоном (рис. 2.52).

Пластмассовые мультициклоны диаметром 10, 15 и 20 мм способны задерживать частицы взвеси гидравлической крупности до 0,17 мм/с при потере напора около 0,1 МПа. Подача одного гидроциклона диаметром 15 мм при этой потере напора составляет около 0,07 м³/ч. Подача мультициклона диаметром 1,0 м, состоящего из 320 таких гидроциклонов, составляет порядка 500 м³/сут.

При расчете гидроциклона первоначально по кривой осаждения взвеси определяют расчетную гидравлическую крупность извлекаемых примесей. Затем по графику рис. 2.51 находят диаметр аппарата и последующим технико-экономическим расчетом уточняют его параметры.

Гидроциклоны целесообразно использовать в системах хозяйственно-питьевого и промышленного водоснабжения для предварительного осветления поверхностных вод, обладающих высокой кратковременной мутностью (более 1500 мг/л). Применение гидроциклонов вследствие их небольшой стоимости позволяет сократить затраты на строительство и эксплуатацию сооружений для предварительного осветления воды.

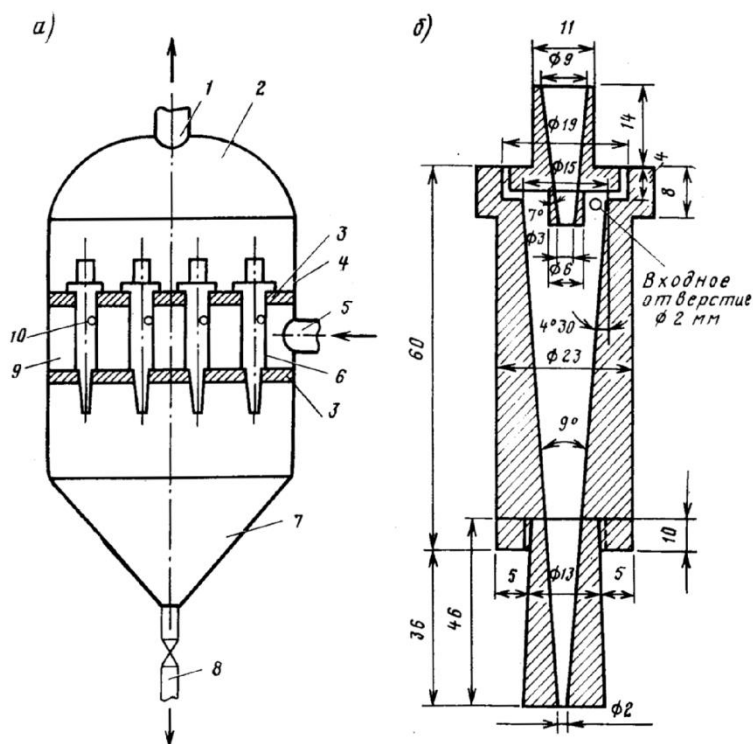


Рис. 2.52. Схема мультициклона (а) и гидроциклона диаметром 15 мм (б):

1,5 – сливной и питающий патрубки; 2, 9 – камера сбора осветленной и распределения исходной воды; 3 – разделительные плиты; 4 – цилиндрическая часть аппарата; 6 – гидроциклоны диаметром 10 мм (15 или 20 мм); 7 – шламовая камера; 8 – патрубок сброса шлама; 10 – входное отверстие

2.7. Фильтрация воды

2.7.1. Теоретические основы процесса фильтрации воды через зернистые материалы. Классификация фильтров

Фильтрация – один из способов осветления воды, позволяющий выделить из нее не только диспергирование, но коллоидные примеси, которые задерживаются на поверхности или в межпоровом пространстве фильтрующего материала. Этот процесс сопровождается значительными затратами энергии, что определяет место фильтровальных сооружений в технологической схеме. В большинстве случаев фильтрация – заключительный этап при осветлении и обесцвечивании питьевой воды.

По виду фильтрующей основы фильтры делятся на тканевые или сетчатые (микрофильтры, барабанные сита, акустические фильтры и т.п.); каркасные или намывные; зернистые (песчаные, керамзитовые и т.п.). В технологиях улучшения качества воды распространены фильтры с зернистой загрузкой, которые классифицируют по следующим основным признакам:

- по скорости фильтрации: медленные (0,1-0,3 м/ч), быстрые (5-12 м/ч) и сверхбыстрые (25-100 м/ч);
- по давлению, под которым они работают: безнапорные (открытые) и напорные;
- по направлению фильтрующего потока: одноструйные (обычные быстрые и медленные фильтры), двухструйные (фильтры АКХ и ДДФ) и многоструйные;
- по числу фильтрующих слоев: одно-, двух-, трех-, и многослойные;
- по крупности зерен фильтрующего материала: мелко-, средне-, крупнозернистые.

Быстрые фильтры с площадью более 30 м² устраивают с центральным каналом, а при меньшей площади – с боковым карманом. Коагулированная и

прошедшая предочистку вода подается в боковой карман, а из него – в камеру фильтра. Высота слоя воды над поверхностью загрузки должна быть не менее 2 м. В процессе фильтрования вода проходит фильтрующий и поддерживающий слой, а затем поступает в распределительную систему, из нее в резервуар чистой воды.

При промывке фильтров промывная вода поступает в распределительную систему и далее в фильтрующей слой, который она проходит снизу вверх, расширяя (взвешивая) его. Дойдя до верхней кромки желобов, промывная вода вместе с вымытыми из фильтрующего материала загрязнениями переливается в желоба, а из них в боковой карман и отводится в водосток.

Расчетную скорость фильтрования v (6-10 м/ч) и толщину слоя однослойной фильтрующей загрузки h (0,7-2,0 м) в соответствии со СНиПом следует принимать в зависимости от крупности зерен загрузки.

Фильтрующий слой выполняют из отсортированного материала, чаще всего речного кварцевого песка крупностью от 0,5 до 2,0 мм. Могут быть применены и другие материалы, удовлетворяющие санитарным требованиям и обладающие достаточной химической стойкостью и механической прочностью (дробленый антрацит, керамзит, керамическая крошка, дробленый мрамор, полимеры и др.).

Поддерживающий слой (0,45-0,5 м), на котором лежит фильтрующий слой, укладывают с целью, чтобы мелкий фильтрующий материал не вымывался из фильтрующего слоя и не уносился вместе с фильтруемой водой через отверстия распределительной системы. Поддерживающий слой в свою очередь состоит из слоев гравия или щебня разной крупности, увеличивающейся сверху вниз от 2-5 до 20-40 мм. Толщина каждого слоя также увеличивается сверху вниз. Недостатком поддерживающих слоев является возможность их смещения при промывке, что нарушает работу фильтра.

Распределительная или дренажная система является важным элементом фильтра. Она должна собирать и отводить профильтрованную воду без выноса

зерен фильтрующего материала, а при промывке – равномерно распределять промывную воду по площади фильтра. Для скорых фильтров применяют распределительные системы большого сопротивления. Равномерность распределения промывной воды по площади в таких системах достигается вследствие большого сопротивления движению воды через проходные отверстия.

Наиболее распространены *трубчатые* распределительные системы – чугунные, полимерные или стальные трубы с отверстиями 10-12 мм, укладываемые параллельно на расстоянии 0,25-0,35 м друг от друга нижних слоев гравия и присоединяемые к коллектору (трубе большого диаметра) или каналу, расположенному в середине днища фильтра параллельно его длинной стороне. Отверстия в трубах располагаются вертикально или в шахматном порядке снизу под углом 45° к вертикали. Общая площадь отверстий должна составлять 0,25 - 0,3% площади фильтра.

В последние годы разработано много новых конструкций распределительных устройств. Из них наибольшее распространение получили щелевые, колпачковые системы, системы с применением пористых керамических или бетонных плит. Большим достоинством этих конструкций является то, что они дают возможность отказаться от поддерживающих слоев, благодаря чему уменьшается высота и, следовательно, стоимость фильтра; кроме того, устраняется опасность неравномерного распределения воды из-за смещения поддерживающих слоев при промывке.

Щелевое распределительное устройство представляет собой систему труб со щелями или ложное щелевое дно. Ширина щелей должна быть на 0,1мм меньше размера самой мелкой фракции загрузки. Для трубчатого щелевого дренажа следует применять трубы из нержавеющей стали либо полиэтилена. Щели располагаются равномерно поперек оси по периметру трубы не менее чем в два ряда на расстоянии не менее 20 мм друг от друга. Общая площадь щелей составляет 1,5-2% площади фильтра.

Колпачковая распределительная система монтируется в дренажном (ложном) дне или на распределительных трубах из расчета 35-50 колпачков на 1 м² площади фильтра. Выпускают колпачки двух видов: щелевые пластмассовые (ВТИ-К) и фарфоровые (ВТИ) или пористые. Скорость движения воды или водовоздушной смеси в щелях колпачков принимают не менее 1,5 м/с. Общая площадь проходных отверстий всех колпачков должна составлять 0,8-1,0% рабочей площади фильтра.

Распределительная система из **пористых сборных керамических, полимербетонных или бетонных плит**, устраиваемая в виде промежуточного днища, не требует поддерживающего слоя. Керамические плиты выпускаются размером 40х40х5 или 25х50х5 см. Размеры пор в плитах в два с лишним раза больше размеров пустот в фильтрующем слое при среднем диаметре зерен песка 0,75 мм. Поэтому загрязнения, прошедшие через фильтрующий слой, проходят и через пористый дренаж, практически не загрязняя его. Плиты изготавливают и из пористого бетона и полимербетона сборными и реже монолитными. Замену плит производят через 7-8 лет.

Большое распространение получили **трубчатые безгравийные дренажи** на основе пористых полимерных материалов или сеток. Например, трубофильтр «Экотон» конструктивно представляет собой трубчатое изделие, в котором перфорированный несущий каркас (полиэтиленовая труба) меньшего диаметра размещен внутри волокнисто-пористой трубы с образованием воздушного зазора между ними (ЭФТ/В). Компанией «Экополимер» выпускаются фильтры дренажные АФТ АПМ-ДФ, которые состоят из опорной трубы (каркаса), поверхность которой имеет двухслойное покрытие, наружный слой которого защитно-фильтрующий. Каркас АФТ имеет сложный геометрический профиль в виде чередующихся гребней и впадин.

Развитием щелевого дренажа являются арочные конструкции из нержавеющей стали, например, дренажная система «Тритон» или «АКВАДЕФ-МТ». В основе щелевых дренажно-распределительных систем лежат щелевые

решётки полуцилиндрической формы, выполненные из проволоки V-образного профиля из нержавеющей стали. Внутреннее распределительное устройство выполнено из перфорированных U-образных желобов для отвода воды и подачи водовоздушной смеси при промывке. В нижней части фильтрационной камеры имеется лоток для сбора фильтрованной воды и подачи водовоздушной смеси для промывки фильтров.

Последние разработки в области щелевых дренажных систем – это система, производимая компанией «Leopold», представляющая каналы прямоугольного сечения со встроенными щелевыми пластинами (т.н. покрытие I.M.S.), с камерами подачи и компенсации в пределах поперечного сечения одинарного блока. Все элементы выполнены из пластика.

Физическая сущность действия распределительных систем большого сопротивления заключается в том, что гидродинамическая неустойчивость взвешенного слоя загрязненной загрузки нейтрализуется сопротивлением отверстий или щелей на пути движения воды. Для обеспечения равномерности распределения промывной воды по площади фильтра необходимо, чтобы суммарное сопротивление на пути потока промывной воды (сопротивление в распределительной системе сопротивление в загрузке) возрастало с увеличением интенсивности промывки.

Интенсивность промывки скорых фильтров принимается в зависимости от требуемого относительного расширения, типа загрузки, температуры воды и составляет 12-18 л/с·м². Продолжительность промывки 6-10 мин.

Поперечное сечение промывного желоба может быть с треугольным дном или полукруглым. Расстояние между желобами (по их осям) принимают в пределах 1,4-2,2 м. Дну желоба придается уклон 0,01 по ходу движения воды. Сборные желоба можно изготавливать из железобетона, металла или стеклопластика.

Вода подается на промывку специальным промывным насосом из резервуара чистой воды или из канала профильтрованной воды. Можно

подавать воду и самотеком из специально установленного на требуемой высоте промывного бака или промывной башни. Объем бака должен быть рассчитан на две промывки (при промывке одного фильтра) или на три промывки (при одновременной промывке двух фильтров).

При реагентном умягчении воды или реагентом обезжелезивании наряду с обычной промывкой целесообразно применять поверхностную промывку с целью отмывки загрязнений в верхнем слое загрузки. Ее можно производить с помощью дырчатых неподвижных или вращающихся промывных труб, через которые под напором 0,3-0,4 МПа подается вода. Скорость в подводящих трубах 2,5-3 м/с, скорость выхода воды из отверстий 8-10 м/с, интенсивность промывки 3-4 л/(с·м²)

Теоретические основы очистки воды фильтрованием через зернистые материалы рассматривались многими исследователями. Наибольшее признание получила теория Д.М. Минца. Она экспериментально подтверждена и доведена до практического использования.

Согласно теории Д.М. Минца, при движении воды, содержащей взвешенные частицы, через зернистую загрузку фильтровальных аппаратов последние задерживаются загрузкой и вода осветляется. Одновременно в толще загрузки накапливаются загрязнения, вследствие чего уменьшается свободный объем пор, увеличивается гидравлическое сопротивление загрузки. Возрастание гидравлического сопротивления приводит к росту потери напора в загрузке.

*Извлечение примесей из воды и их закрепление на зернах фильтрующей загрузки происходит под действием сил адгезии. Осадок, накапливающийся в загрузке из задержанных примесей, имеет весьма непрочную структуру. Под влиянием гидродинамических сил потока эта структура разрушается и некоторая часть ранее прилипших частиц отрывается от зерен загрузки в виде мелких хлопьев и переносится в последующие слои загрузки (суффозия), где вновь задерживается в поровых каналах. Следовательно, *осветление воды в**

зернистой загрузке следует рассматривать как суммарный *результат* двух противоположных процессов: процесса *адгезии* и процесса *суффозии*. Осветление воды в каждом элементарном слое загрузки происходит до тех пор, пока интенсивность прилипания частиц превышает интенсивность их отрыва. По мере накопления осадка интенсивность отрыва частиц увеличивается. Кинетика прилипания и отрыва частиц определяет ход процесса осветления воды по толщине слоя фильтрующей загрузки.

По мере насыщения верхних слоев загрузки возрастает роль ниже расположенных, а толщина загрузки, необходимая для извлечения из воды взвеси, увеличивается. Затем наступает такой момент, когда вся толщина загрузки недостаточна для обеспечения необходимой степени осветления воды и концентрация взвеси на выходе из загрузки начинает возрастать. *Время, в течение которого загрузка способна осветлять воду до требуемой степени, называется временем защитного действия загрузки.* До достижения этого времени на выходе из загрузки получают воду надлежащего качества. По истечении времени защитного действия качество фильтрата начинает быстро ухудшаться.

Извлекаемые слоем из воды частицы образуют осадок на зернах слоя, накапливающийся в ходе процесса.

Осадок, образующийся в зернистой загрузке при фильтровании воды, изменяет поперечное сечение и форму поровых каналов, т.е. геометрическую структуру пористой среды. Из теории фильтрования однородных жидкостей известно, что геометрическая структура пористой среды оказывает существенное влияние на ее гидравлическое сопротивление. Поэтому при накоплении осадка гидравлическое сопротивление зернистого слоя изменяется и потери напора в нем растут.

Соотношение между продолжительностью защитного действия загрузки t_z и времени, в течение которого достигается предельная потеря напора t_n , могут быть различные. Когда $t_z > t_n$ фильтр выключают на промывку в связи с тем, что

дальнейший прирост потери напора невозможен, так как существующий напор, обусловленный расположением сооружений, расходуется на преодоление сопротивления загрузки. Когда $t_3 < t_n$, фильтр выключают на промывку в связи с начинающимся ухудшением качества фильтрата, а когда $t_3 = t_n$, то моменты достижения предельной потери напора и начала ухудшения качества фильтрата совпадают. С технико-экономической точки зрения наилучшим соотношением является $t_3 = t_n$. Так, условие $t_3 > t_n$ означает, что задерживающая способность загрузки используется не полностью, так как фильтр выключают на промывку (при предельной потере напора), хотя он мог бы еще в течение некоторого времени работать, выдавая воду требуемого качества. При $t_3 < t_n$ не полностью используется располагаемый напор, так как фильтр выключают на промывку (вследствие ухудшения качества фильтрата) в момент, когда потеря напора в загрузке не достигла своего максимума.

При фильтровании воды через слой зернистого материала в зависимости от заряда и соотношения размеров примесей воды и зерен фильтрующей загрузки могут наблюдаться следующие виды фильтрования:

- 1) задержание примесей на поверхности фильтрующего слоя (пленочное фильтрование);
- 2) задержание примесей в порах фильтрующего слоя (объемное фильтрование);
- 3) одновременное образование примесями пленки и их отложение в порах загрузки.

В большинстве случаев на современных фильтрах пленка не образуется и примеси вместе с водой проникают загрязнений в толщу фильтрующего слоя, при этом глубина проникания загрязнений в толщу загрузки тем больше, чем больше скорость фильтрования, крупнее зерна фильтрующего слоя и чем меньше размеры частиц взвеси, извлекаемых из воды. В основе объемного фильтрования лежит предварительное коагулирование примесей воды с целью уменьшения и ликвидации их заряда. Так как при обычных значениях pH

исходной воды поверхность зерен фильтрующего материала и частицы примесей воды несут отрицательный заряд, взвесь в порах фильтрующего слоя задерживается плохо.

2.7.2. Скорые открытые и напорные фильтры, их устройство и расчет

Расчет скорых фильтров предусматривает определение их площади и числа, нахождение числа и размеров промывных желобов, подбор фильтрующей загрузки, определение размеров элементов распределительной системы, бокового кармана или центрального канала и трубопроводов обвязки. Фильтры и их коммуникации должны рассчитываться на работу при нормальном и форсированном режимах.

Общую площадь фильтров комплекса F_{ϕ} , м², определяют по формуле:

$$F_{\phi} = \frac{Q}{Tv_n - n_{np}q_{np} - n_{np}t_{np}v_n}, \quad (2.37)$$

где Q – полезная суточная производительность комплекса, м³/сут; T – период работы водоочистного комплекса в течение суток, ч; v_n – расчетная скорость фильтрования при нормальном режиме, м/ч; n_{np} – число промывок одного фильтра в сутки при нормальном режиме эксплуатации; q_{np} – удельный расход воды на одну промывку фильтра, м³/м²; t_{np} – время простоя фильтра в связи с промывкой: при промывке водой $t_{np} = 0,33$ ч, водой и воздухом $t_{np} = 0,5$ ч.

Количество фильтров на водоочистном комплексе с суточной производительностью свыше 1600 м³ принимают не менее четырех. При суточной производительности комплекса более 8...10 тыс. м³ число фильтров N_{ϕ} находят из выражения $N_{\phi} = 0,5\sqrt{F_{\phi}}$ при соблюдении соотношения

$$v_{\phi} = \frac{v_n N_{\phi}}{N_{\phi} - N} \quad (2.38)$$

где v_{ϕ} – скорость фильтрования при форсированном режиме, м/ч; N – число фильтров в ремонте.

Площадь одного фильтра следует принимать не более 120 м².

Поперечное сечение промывного желоба может быть пятиугольным с треугольным дном или полукруглым. Расстояние между желобами (по их осям) принимают в пределах 1,4...2,2 м. Дну желоба придается уклон 0,01 по ходу движения воды. Сборные желоба можно изготавливать из железобетона, асбестоцемента или стеклопластика. В качестве сборного промывного устройства могут быть применены также дырчатые трубы, располагаемые ниже уровня воды на фильтре на расстоянии 0,7...0,8 м друг от друга. Ширину желоба B определяют по формуле

$$B = K_{\text{жс}} \left[\frac{q_{\text{жс}}^2}{(1,57 + a_{\text{жс}})^3} \right]^{0,2}, \quad (2.39)$$

где $K_{\text{жс}}$ — коэффициент, принимаемый равным: для желобов с треугольным лотком – 2,1, с полукруглым – 2; $q_{\text{жс}}$ – расход промывной воды по желобу, м³/с; $a_{\text{жс}} = 1...1,5$ – отношение высоты прямоугольной части желоба к половине его ширины.

Желоба располагают от поверхности фильтрующей загрузки на такой высоте $H_{\text{жс}}$, чтобы в них попадали только вымытые загрязнения:

$$H_{\text{жс}} = \frac{H_3 e_3}{100} + 0,3, \quad (2.40)$$

где H_3 – высота фильтрующего слоя, м; e_3 – относительное расширение фильтрующей загрузки, принимаемое по СП в пределах 25...50 %.

Расстояние от дна желоба до дна бокового кармана или центрального канала H_k определяют из выражения

$$H_k = 1,73 \left(\frac{q_k^2}{gB_k^2} \right)^{1,3} + 0,2, \quad (2.41)$$

где q_k – расход промывной воды по каналу, м³/с; $B_k = 0,7 \dots 0,8$ – ширина канала, м.

Параметры фильтрующей загрузки и режим работы фильтра надлежит принимать по табл. 15 СП 31.13330.2012 (табл. 2.3).

Таблица 2.3

Параметры фильтрующей загрузки и режим работы скорых фильтров

Фильтры	Характеристика фильтрующего слоя					Скорость		
	Материал загрузки	Диаметр зерен, мм			Коэффициент неоднородности загрузки	Высота слоя, м	фильтрования, м/ч	
		Наименьших	Наибольших	Эквивалентный			При нормальном режиме v_n	При форсированном режиме v_{ϕ}
Однослойные скорые фильтры с загрузкой различной крупности	Кварцевый песок	0,5	1,2	0,7-0,8	1,8-2	0,7-0,8	5-6	6-7,5
		0,7	1,6	0,8-1	1,6-1,8	1,3-1,5	6-8	7-9,5
		0,8	2	1-1,2	1,5-1,7	1,8-2	8-10	10-12
	Дробленый керамзит	0,5	1,2	0,7-0,8	1,8-2	0,7-0,8	6-7	7-9
		0,7	1,6	0,8-1	1,6-1,8	1,3-1,5	7-9,5	8,5-11,5
		0,8	2	1-1,2	1,5-1,7	1,8-2	9,5-12	12-14

Скорые фильтры с двухслойн ой загрузкой	Кварцевы й песок	0,5	1,2	0,7-0,8	1,8-2	0,7-0,8	7-10	8,5-12
	Дроблены е керамзит или антрацит	0,8	1,8	0,9-1,1	1,6-1,8	0,4-0,5		

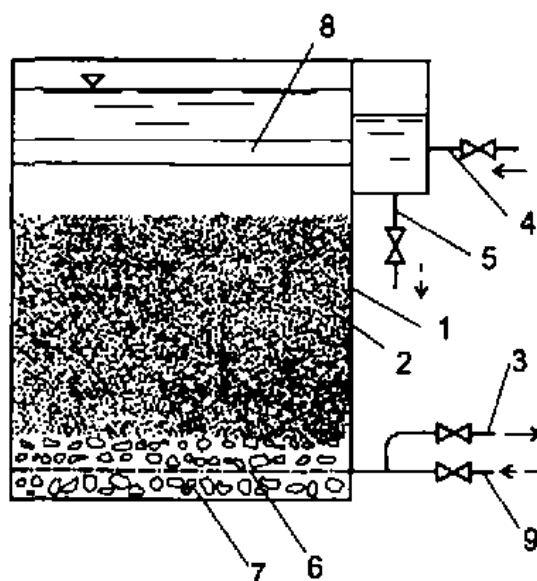


Рис. 2.53. Схема скорого фильтра:

1 – корпус; 2 – фильтрующая загрузка; 3 – отвод фильтрата; 4 – подача исходной воды; 5 – отвод промывной воды; 6 – нижняя дренажная система; 7 – поддерживающий слой; 8 – желоб для сбора промывной воды; 9 – подача воды на промывку

Распределительные системы скорых фильтров устраивают с поддерживающими слоями и без них. Они могут быть трубчатыми, щелевыми, пористыми, в виде ложного дна. Потери напора в распределительной системе следует находить по формуле

$$h = \xi \frac{v_o^2}{2g} + \frac{v_k^2}{2g}, \quad (2.42)$$

где v_k – скорость в начале коллектора, принимаемая при промывке 0,8...1,2 м/с;
 ξ – коэффициент гидравлического сопротивления, принимаемый по СП; v_o –
средняя скорость на входе в ответвления, принимаемая при промывке 1,6...2
м/с.

В технологии обработки воды наряду со скорыми фильтрами широко
применяют контактные фильтры (КФ), двухпоточные двухслойные фильтры
(ДДФ) и каркасно-засыпные скорые фильтры. Это фильтры большой
грязеемкости. Под **грязеемкостью** подразумевают количество загрязнений,
задержанных фильтрующей загрузкой в течение фильтроцикла (т.е. от
промывки до другой промывки), отнесенное к единице площади фильтрования.



а)



б)



в)

Рис. 2.54. Внешний вид скорых фильтров:

а) зал скорых фильтров; б) коридор трубопроводов; в) вид на сборные желоба, загрузку и дренажную систему

2.7.3. Фильтрующие материалы

Фильтрующая загрузка является основным рабочим элементом фильтровальных сооружений, поэтому правильный выбор ее параметров имеет первостепенное значение для их нормальной работы. При выборе фильтрующего материала основополагающими являются его стоимость, возможность получения в районе строительства данного фильтровального комплекса и соблюдение определенных технических требований, к числу которых относятся: надлежащий фракционный состав загрузки; определенная степень однородности размеров ее зерен; механическая прочность; химическая стойкость материалов по отношению к фильтруемой воде.

Однородность и крупность фильтрующего материала определяют ситовым анализом путем просеивания навески материала через ряд калиброванных сит. Калибр сита определяется диаметром шара, равновеликого по объему наиболее крупным зернам фильтрующего материала, проходящим еще через данное сито.

Эквивалентный диаметр зерен $d_{\text{э}}$, мм, определяют по формуле

$$d_9 = \frac{100}{\sum \frac{p_i}{d_k}} \quad (2.43)$$

где p_i – процентное содержание (по массе) фракций со средним диаметром зерен d_k , т.е. масса просеиваемых зерен, оставшихся на сите калибром d_k .

Коэффициент неоднородности фильтрующей загрузки определяют как отношение 80%-го калибра материала к его 10%-му калибру; $k_n = d_{80}/d_{10}$. Важным показателем качества фильтрующего материала является его механическая прочность. *Механическую прочность* фильтрующих материалов оценивают двумя показателями: *истираемостью* (т.е. процентом износа материала вследствие трения зерен друг о друга во время промывок – до 0,5%) и *измельчаемостью* (процентом износа вследствие растрескивания зерен – до 4,0%).

Наиболее распространенным фильтрующим материалом является кварцевый песок – речной или карьерный. Кварцевый песок при небольшом содержании примесей известняка отвечает всем вышеперечисленным требованиям, предъявляемым к фильтрующим материалам. Наряду с песком применяют антрацит, керамзит, горелые породы, шунгизит, вулканические и доменные шлаки, гранодиорит, пенополистирол и др.

В качестве фильтрующих материалов могут быть использованы также отходы промышленных производств, доменные шлаки и шлаки медно-никелевого производства. Достоинством шлаков является то, что они обычно имеют фракционный состав, близкий к тому, который требуется для загрузки фильтровальных аппаратов.

В качестве фильтрующего материала на фильтрах с плавающей загрузкой используют пенополистирол. Этот зернистый материал получают вспучиванием в результате тепловой обработки исходного материала – полистирольного бисера, выпускаемого химической промышленностью. При

вспенивании получают плавающие в воде зерна, имеющие плотность от 100 до 200 кг/м³.

Находят применение активные фильтрующие материалы, которые благодаря своим свойствам могут извлекать из воды не только взвешенные и коллоидные примеси, но и истинно растворенные загрязнения. Так, для стабилизационной обработки воды применяют мраморную крошку и магномассу. Все более широко применяют активные угли для извлечения из воды веществ, обуславливающих привкусы и запахи. Применяют природный ионообменный материал клиноптилолит для удаления из воды растворенных соединений фтора и азота. Однако, доступность и дешевизна этого материала позволяют все более широко применять его в качестве загрузки фильтровальных аппаратов.

Поддерживающие слои способствуют более равномерному распределению промывной воды по площади фильтра и поддерживают фильтрующую загрузку. В качестве поддерживающих слоев применяют гравий или щебень изверженных пород; примесь зерен известняка в них допускается не более 15%, а примесь зерен мела недопустима.

2.7.4. Промывка фильтровальных аппаратов

Момент работы фильтра, когда потеря напора в фильтрующей загрузке достигает предельно допустимого значения или начинает ухудшаться качество фильтрата, служит сигналом для выключения фильтра на промывку в целях восстановления задерживающей способности загрузки. Промывку фильтрующей загрузки в скорых фильтрах производят обратным током воды, или воды и воздуха, для чего, как правило, используют фильтрованную воду. Перед промывкой фильтра подачу воды на него прекращают. Когда уровень воды в нем понизится до кромки желобов, начинают подачу промывной воды в нижнюю дренажную систему фильтра (от специального промывного насоса или

от бака, расположенного на определенной высоте). Промывная вода, равномерно распределяется по площади фильтра и поднимается вверх через загрузку с такой интенсивностью, которая обеспечивает переход зерен фильтрующей загрузки во взвешенное состояние. При этом загрузка как бы расширяется и поверхность, которую она занимала в процессе фильтрования, приближается к кромке желобов.

При взвешенном состоянии загрузки отдельные зерна ее непрерывно соприкасаются друг с другом, в результате чего налипшие на них загрязнения оттираются и вместе с потоком промывной воды переливаются в желоба, откуда отводятся в карман (или центральный канал) фильтра и далее сбрасываются в канализацию. Фильтр промывают до тех пор, пока вода, переливаемая в желоба, не станет прозрачной. Для нормально работающих скорых фильтров продолжительность промывки составляет 8...10 мин.

Промывка фильтров оказывает большое влияние на режим работы фильтров. Если в процессе промывки фильтрующая загрузка отмывается недостаточно, то это приводит к постепенному накоплению остаточных загрязнений, что сокращает фильтроцикл, а в отдельных случаях и вовсе выводит фильтр из работы. Поэтому конструктивное оформление большинства деталей и оборудования фильтров диктуется условиями его промывки.

Основной задачей при расчете промывки фильтров является установление такой интенсивности промывки и такого относительного расширения слоя загрузки, при которых обеспечивается практически полная отмывка зерен загрузки от прилипших к ним в процессе фильтрования загрязнений.

Для достижения одного и того же значения относительного расширения загрузки скорость восходящего потока воды должна быть тем больше, чем больше плотность материала загрузки и диаметр d зерен загрузки; необходимая скорость v уменьшается с увеличением вязкости воды (т. е. при низких температурах воды) и с увеличением коэффициента формы, т. е. для угловатых частиц.

Теоретические исследования, а также опыт эксплуатации фильтров рекомендуют следующие относительные расширения загрузок и необходимые интенсивности промывки. Для антрацитовых загрузок интенсивности промывки следует принимать на 70% меньшими, чем указаны в табл. 15 СП для песчаных загрузок скорых фильтров.

Для загрузок из кварцевого песка при >1 мм в целях повышения эффекта отмывки, снижения расхода промывной воды и уменьшения размеров водоотводящих устройств (желобов, каналов, трубопроводов), целесообразно применение *водовоздушной промывки*. Ее режим назначается следующим: продувка воздухом с интенсивностью $15...20$ л/(с•м²) в течение 1...2 мин, затем совместная водовоздушная промывка с интенсивностью подачи воздуха $15...20$ л/(с•м²) и воды $3...4$ л/(с•м²) в течение 4...5 мин и последующая подача одной воды с интенсивностью $6...8$ л/(с•м²) в течение 4...5 мин. При водовоздушной промывке воду и воздух следует подавать по отдельным трубчатым распределительным системам или через распределительные системы со специальными колпачками.

Водовоздушную промывку рекомендуется применять для песчаных фильтров с системой горизонтального отвода промывной воды с пескоулавливающим желобом, образуемым двумя наклонными стенками — отбойной и водосливной (рис. 2.55, в). При использовании фильтрующих загрузок из дробленых антрацита и керамзита водовоздушная промывка не допускается.

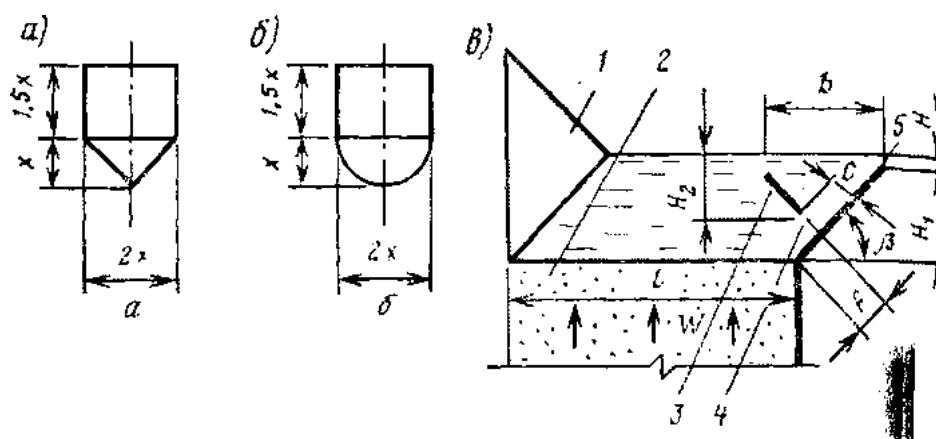


Рис. 2.55. Устройства для сбора и отведения промывной воды фильтровальных аппаратов.

а – желоб с треугольным днищем, $A = 4x^2$; *б* – желоб с полукруглым днищем, $A = 4,57x^2$; *в* – система с боковым отводом промывной воды с пескоулавливающим устройством; 1 – струенаправляющий выступ; 2 – загрузка; 3, 5 – отбойная и переливная стенка пескоулавливающего устройства; 4 – щель для возврата выносимого песка, $a=15-20$ мм, $б=30-40$ мм

Скорость движения воды в трубопроводах, подающих и отводящих воду, назначают 1,5...2 м/с. Для удаления воздуха из трубопровода, подающего воду на промывку фильтров, располагаемого ниже кромки их желобов, необходимо предусматривать стояки – воздушники диаметром 75...150 мм.

Для промывки фильтра, особенно если его площадь велика, приходится в течение 7...9 мин подавать большое количество воды, для чего требуется установка мощных насосов и электродвигателей. При наличии же промывного бака требуемое для промывки количество воды может подаваться в бак в течение сравнительно длительного времени (в зависимости от графика промывки фильтров), для чего потребуется насос значительно меньшей производительности. В этом случае можно подавать воду и от водоводов насосной станции II подъема. С другой стороны, устройство бака, располагаемого на высоте 10...15 м от уровня пола первого этажа, как правило, вызывает увеличение объема строительных работ и удорожание строительства. Поэтому вариант подачи промывки воды выбирают на основании технико-экономических расчетов с учетом ряда местных условий: возможности получения мощных насосов и электродвигателей, возможности расположения

промывного бака на естественном возвышении, производительности водоочистной станции и др. При количестве фильтров более 20 промывной бак предусматривать не следует, так как время между промывками различных фильтров будет незначительным и недостаточным для наполнения бака. Вместимость бака для промывки фильтров подсчитывают, исходя из возможности последовательной промывки двух фильтров, по формуле

$$V_6 = \frac{2\omega AT 60}{1000} = 0,12\omega AT, \quad (2.44)$$

где w — принятая интенсивность промывки фильтра, л/(с·м²); A — площадь одного фильтра, м²; T — продолжительность промывки фильтра, мин.

Подачу промывного насоса определяют как произведение площади одного фильтра на принятую интенсивность промывки. Промывной насос забирает воду из резервуара чистой воды, в котором дополнительно должен предусматриваться запас воды на две последовательно проводимые промывки. Следует устанавливать два промывных насоса, из которых один резервный. Напор, развиваемый промывным насосом, или высота расположения промывного бака над уровнем отводных устройств фильтра, складывается из следующих величин: суммы гидравлических сопротивлений в трубопроводе и арматуре на пути движения промывной воды, сопротивлений в распределительной системе (дренаже) фильтра; сопротивления в загрузке фильтра; разности отметок отводных устройств фильтра и дна резервуара чистой воды (учитывается только при промывке от насоса); запаса не учтенные сопротивления, принимаемого равным 1,5...2 м. вод. ст.

Сопротивления в трубопроводах подсчитывают по таблицам, исходя из скорости движения воды 2...2,5 м/с, причем отдельно подсчитывают потери напора на местные сопротивления в тройниках, коленах, так как местные потери относительно велики по сравнению с сопротивлением в трубопроводе. Сопротивление в распределительной системе фильтра определяется при

расчете этих систем. Сопротивление в загрузке фильтра принимается равным высоте загрузки.

При реагентном умягчении воды или реагентом обезжелезивании наряду с обычной промывкой целесообразно применять поверхностную промывку с целью отмывки загрязнений в верхнем слое загрузки и экономии (до 50%) промывной воды. Ее можно производить с помощью неподвижных или вращающихся промывных труб, или труб, располагаемых непосредственно над поверхностью фильтрующей загрузки. Струи воды, выходя с большими скоростями из отверстий или насадок промывной системы, разбивают и размельчают осевшие загрязнения, облегчая удаление их из фильтра. Размытый верхней промывкой фильтрующий слой в начале промывки снизу уже не поднимается вверх монолитным пластом, а взвешивается отдельными зернами в потоке промывной воды, *При вращающейся системе поверхностной промывки* расходуется значительно меньшее количество промывной воды, чем при стационарной, при одинаковом качестве отмывки фильтрующего слоя. Кроме того, для изготовления вращающейся системы требуется значительно меньше труб. Однако, вращающую систему можно применять только для круглых и квадратных фильтров с размером фильтрующей площади не более 25 м². Для прямоугольных фильтров вращающуюся систему можно использовать при условии, если их площадь делится на два квадрата по 25 м² каждый. На прямоугольных фильтрах, не делимых на два квадрата, и на квадратных фильтрах площадью выше 25 м² следует применять *стационарную систему промывки*.

Вращающаяся система состоит из подвешенной трубы, от которой в центре фильтра опускается стояк, вращающейся пяты на стойке, двух горизонтально расположенных вращающихся труб с насадками и двух растяжек, придающих системе необходимую жесткость. Пята на стойке должна располагаться примерно на уровне кромок желобов, чтобы в нее не могли попадать зерна взвешенной фильтрующей загрузки. Общая длина

вращающейся трубы принимается с таким расчетом, чтобы концы труб не доходили до стенок фильтра на 200...250 мм. На каждом плече вращающейся трубы располагаются насадки таким образом, чтобы при вращении труб струи воды, выходящие из насадок на одном плече трубы, приходились между струями, выходящими из насадок другой трубы. Расстояние между соседними насадками принимают 200...250 мм. При проектировании вращающейся системы для верхней промывки следует принимать: интенсивность промывки – 0,5...0,75 л/(с·м²); скорость движения воды в подводящих трубах – 2,5...3 м/с; напор в подводящем стояке – 0,4...0,5 МПа.

Стационарная система верхней промывки состоит из подводящих трубопроводов и ряда дырчатых труб, прокладываемых на расстоянии 6...8 см над поверхностью фильтрующей загрузки. При проектировании стационарной системы следует принимать: интенсивность промывки – 3...4 л/(с·м²); скорость движения воды в подводящих трубах – 2,5...3 м/с; скорость выхода воды из отверстий – 8...10 м/с; расстояние между дырчатыми трубами – 0,6...1,0 мм; расстояние между отверстиями (направленными вниз под углом 45° к вертикали) – 8,0...10,0 см; напор в подводящем трубопроводе – 0,3...0,4 МПа.

2.7.5. Распределительные системы фильтровальных аппаратов

К распределительным (дренажным) системам скорых фильтров предъявляются следующие основные требования: равномерность распределения промывной воды по площади фильтра; равномерность сбора фильтрованной воды с площади фильтра; достаточная механическая прочность, выдерживающая массу воды и загрузки, а также давление воды при промывке фильтра; незасоряемость отверстий и щелей во время рабочего цикла и при промывке.

В настоящее время применяют следующие типы распределительных систем: из щелевых труб или щелевого ложного дна большого сопротивления,

без гравийных поддерживающих слоев; трубчатый дренаж большого сопротивления, располагаемый непосредственно в загрузке фильтра; колпачковый.

СП 31.13330.2012 рекомендует применять распределительные системы большого сопротивления (трубчатые, колпачковые и в виде ложного дна), поскольку такие системы обеспечивают необходимую равномерность распределения промывной воды.

Трубчатые распределительные системы — чугунные, асбестоцементные, пластмассовые или стальные трубы с отверстиями диаметром 10...12 мм, укладываемые параллельно на расстоянии 0,25...0,35 м друг от друга в нижних слоях гравия и присоединяемые к коллектору (трубе большего диаметра или каналу), расположенному в середине днища фильтра параллельно его длинной стороне. От низа ответвлений до дна фильтра должно быть 8...12 см. Отверстия в трубах располагают вертикально или в шахматном порядке на расстоянии 15...20 см в нижней части под углом 45° к вертикали. Общая площадь отверстий должна составлять 0,25...0,5% площади фильтра.

Щелевое распределительное устройство представляет собой систему труб со щелями или ложное щелевое дно. Ширина щелей должна быть на 0,1 мм меньше размера самой мелкой фракции загрузки. Для трубчатого щелевого дренажа следует применять трубы из нержавеющей стали, либо полиэтилена серии С или Т. Щели располагают равномерно поперек оси и по периметру трубы не менее чем в два ряда на расстоянии не менее 20 мм друг от друга. Общая площадь щелей — 1,5...2% площади фильтра.

Представляет интерес устройство *безгравийных дренажей с использованием тонкослойных (0,6...0,8 мм) щелевых труб из нержавеющей стали.* Изготовление щелевых дренажей из труб нержавеющей стали осуществляет Челябинскэнергоремонт Минэнерго РФ — электроискровым способом. К преимуществам подобных дренажей относятся: относительно небольшой расход металла; большая механическая прочность труб, позволяющая

исключить устройство для них опор; стойкость труб против коррозии и абразивного воздействия; удобство монтажа и легкость прочистки щелей от взвеси и осадка путем обработки труб щелочью или кислотой.

В настоящее время щелевые трубы нашли свое применение преимущественно в дренажных системах напорных фильтров (рис. 2.56).

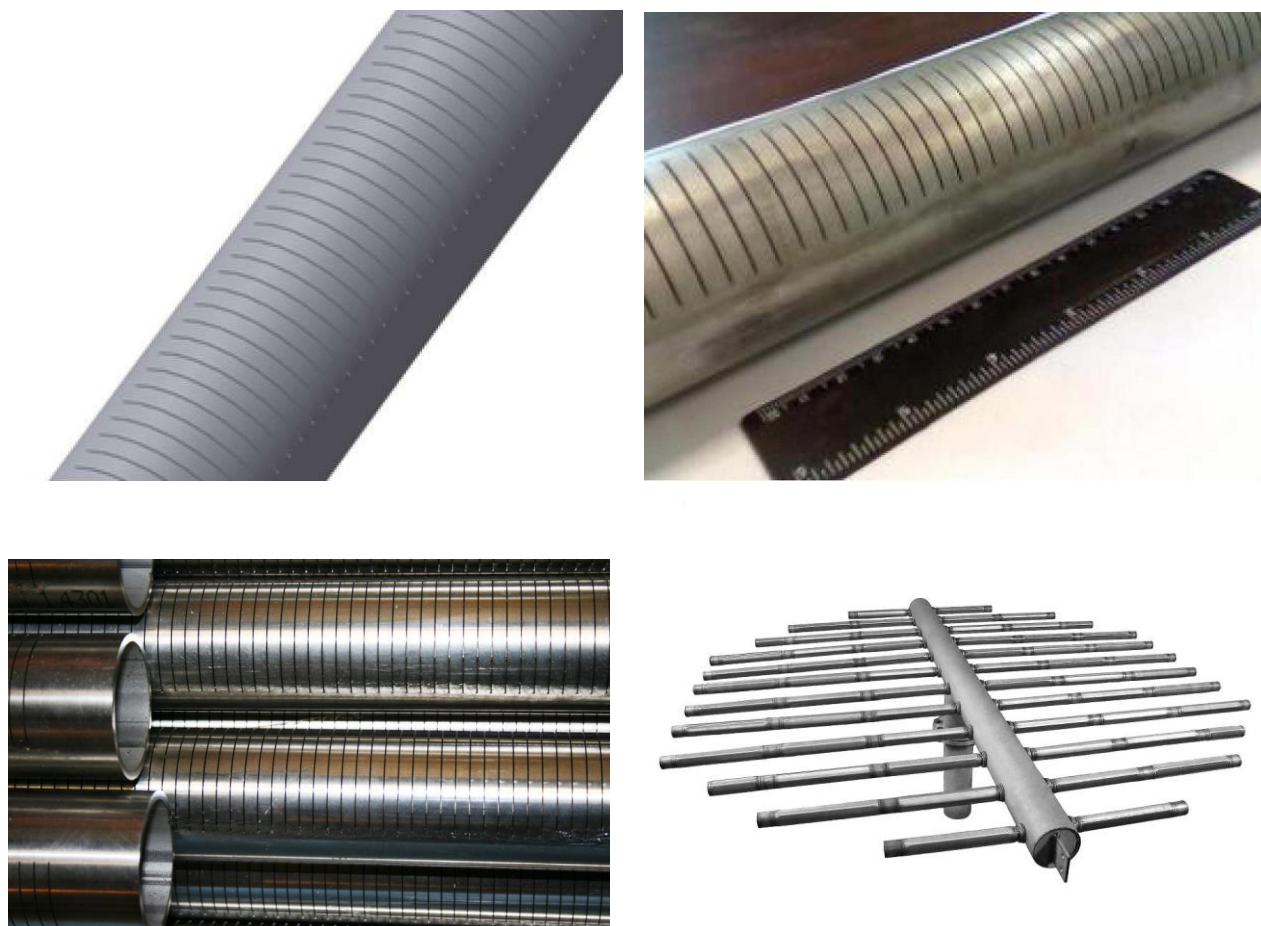


Рис. 2.56. Щелевые трубы для дренажной системы

Колпачковая распределительная система представляет собой систему колпачков, монтируемых на дренажном (с отверстиями) дне или распределительных трубах из расчета 35...50 колпачков на квадратный метр площади фильтра. Отечественная промышленность выпускает колпачки различных видов: щелевые пластмассовые (ВТИ-К), щелевые и дырчатые из нержавеющей стали, фарфоровые (ВТИ) или пористые (рис. 2.57, 2.58). Скорость движения воды или водовоздушной смеси в щелях колпачков

принимают не менее 1,5 м/с. Общая площадь проходных отверстий всех колпачков должна составлять 0,8...1,0 % рабочей площади фильтра. Колпачки устанавливаются либо на распределительные трубы (стальные или пластиковые), либо на ложное днище (рис. 2.59).

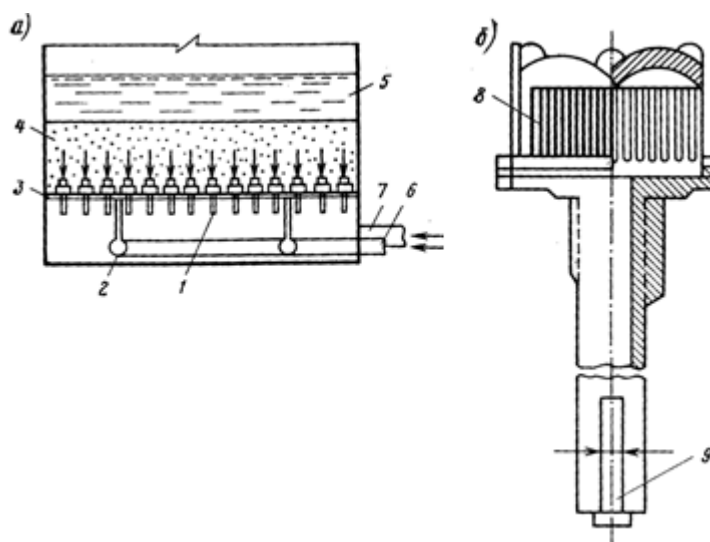


Рис. 2.57. Распределительная (дренажная) система с колпачками В-1: а – колпачковый дренаж; б – колпачок В-1; 1 – длиннохвостный щелевой колпачок; 2 – воздухораспределитель; 3 – «ложное дно» в виде железобетонной плиты; 6, 7 – воздух и вода; 4 – фильтрующая загрузка; 5 – «водяная подушка»; 8 – щели; 9 – щель для входа воздуха



Рис. 2.58. Колпачки для дренажных систем



Рис. 2.59. Дренажные системы с колпачками

Применение колпачковых дренажей в условиях водовоздушной промывки позволяет уменьшить расход промывной воды, снизить строительную стоимость сооружений за счет уменьшения диаметров трубопроводов и снижения объема резервуаров для хранения промывной воды. Эффект отмывки загрязнений из зернистой загрузки фильтра при водовоздушной промывке намного выше, чем при водяной, поэтому некоторое увеличение высоты фильтра с колпачковым дренажем и поддонным пространством по сравнению с фильтрами, не имеющими горизонтальной компенсации, полностью оправдывается большей эффективностью эксплуатации.

Распределительная система из *пористых керамических или бетонных плит*, устраиваемая в виде промежуточного днища; также не требует поддерживающего слоя. Керамические плиты выпускают размерами 40x40x5 или 25x50x5 см. Плиты изготовляют из зерен корунда на керамической связке. После формовки плиты обжигают при температуре около 1900°C, благодаря чему они не поддаются действию влаги и растворов кислот, которые могут

быть применены для очистки плит. Размеры пор в плитах в два с лишним раза больше размеров пустот в фильтрующем слое при среднем диаметре зерен песка 0,75 мм. Поэтому загрязнения, прошедшие через фильтрующий слой, проходят и через пористый дренаж, практически не загрязняя его. Плиты изготавливают и из пористого бетона сборными и реже в монолите. Замену плит производят через 7...8 лет.

Пористый полимербетон изготавливается из заполнителя: щебня или гравия, скрепленного связующим, в качестве которого используются эпоксидные диановые смолы (ЭД-16, ЭД-20 и др.) с отвердителем. Размер зерен заполнителя и количество связующего подбирают так, что остаются открытые сквозные поры, проницаемые для воды, но не допускающие проникновения зерен загрузки.

При применении дренажа фильтров из пористого бетона следует обращать внимание на защиту бетона от коррозии, возникающей в связи с обработкой воды коагулянтами, а также на подачу воды на фильтры с содержанием взвеси не более 15 мг/л, крупностью не более 0,1 мм, во избежание кольматирования дренажа.

Полимербетонные дренажи могут использоваться при водяной и водовоздушной промывках загрузки. Полимербетонные дренажи имеют следующие преимущества перед наиболее распространенными трубчатыми дренажами с поддерживающими слоями: отпадает необходимость в применении гравийных слоев, уменьшается трудоемкость строительно-монтажных работ, повышается надежность работы фильтров, загрузка и перегрузка фильтров могут быть полностью механизированы.

Для открытых скорых фильтров водоочистных станций рекомендуют два типа дренажных систем: 1) из сборных плит, изготовленных полностью из пористого полимербетона; 2) из сборных железобетонных дырчатых плит, отверстия которых заполнены пористым полимербетоном.

Дренаж первого типа (рис. 2.60) состоит из опорных стенок 1, образующих дренажные каналы 2, перпендикулярные сборному каналу фильтра 3, на которые уложены дренажные полимербетонные плиты 4. Непосредственно на плитах находится фильтрующая загрузка 5. На входах в дренажные каналы установлены патрубки большого сопротивления 6 с диафрагмами и отражателями. Для повышения надежности стыковых соединений торцы плит выполнены со скосами в верхней части под углом 45-60°; треугольные пазы между плитами заполняют полимербетонной смесью того же состава, как и полимербетонные плиты (см. рис. 2.66, узел А).

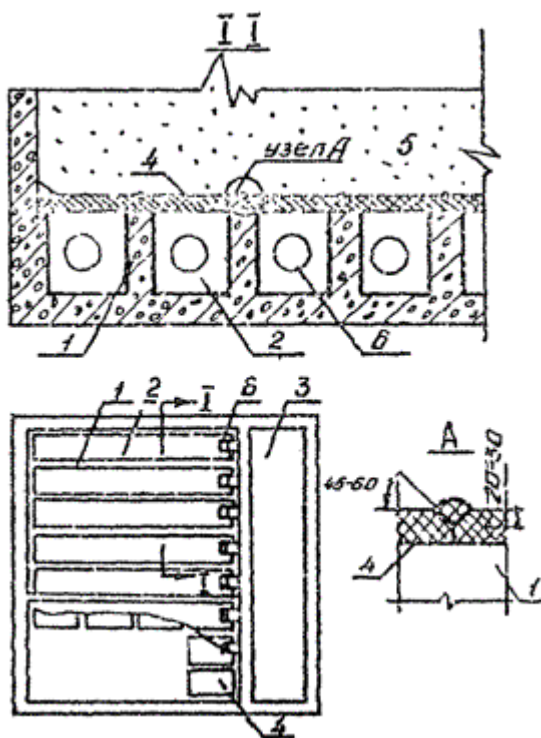


Рис. 2.60. Схема дренажа открытых фильтров (тип 1):

1 - опорные стенки; 2 - дренажные каналы; 3 - сборный канал фильтра; 4 - полимербетонные плиты; 5 - фильтрующая загрузка; 6 - патрубки большого сопротивления

Дренаж второго типа (рис. 2.61) состоит из опор 1 (горизонтальные балки или вертикальные столбики), к которым с помощью анкеров прикреплены дырчатые железобетонные плиты 2. Эти плиты изготавливают на заводах

железобетонных изделий. В стенке сборного канала смонтированы патрубки 4 с отражателями (без диафрагм). Отверстия железобетонной плиты 2 заполнены пористым полимербетоном, обеспечивающим необходимое для распределения промывной воды гидравлическое сопротивление. Сверху плита покрыта слоем полимербетона 5 толщиной 15-20 мм для улучшения равномерности сбора фильтрата и распределения промывной воды. Боковые торцы плит должны быть скошены для упрощения заделки стыков.

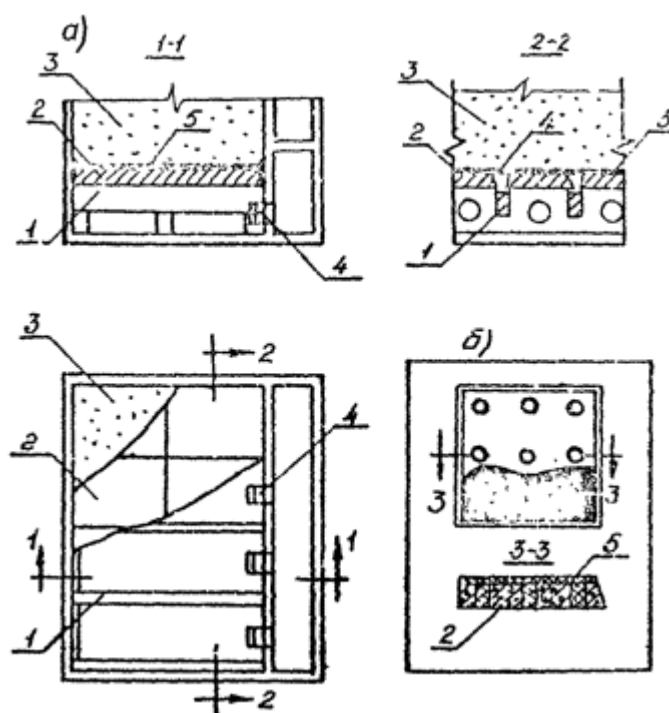


Рис. 2.61. Схема дренажа открытых фильтров (тип 2):

а - план и разрезы фильтра; б - дренажная плита; 1 - опоры; 2 - дырчатые железобетонные плиты; 3 - фильтрующая загрузка; 4 - патрубки; 5 - верхний слой полимербетона

Фильтруемая вода проходит сквозь слой загрузки и дренажные плиты, поступает в поддон фильтра и через патрубки направляется в сборный канал. При промывке вода из сборного канала через патрубки попадает в поддон, проходит дренажные плиты и поступает в загрузку снизу.

При водовоздушной промывке на дне фильтра хомутами крепят воздухораспределительные дырчатые трубы. Общий трубопровод подачи

воздуха для каждой ячейки фильтра следует располагать выше воздухораспределительных труб.

Преимущества дренажей второго типа по сравнению с первым: меньший (в 2-2,5 раза) расход наиболее дорогого компонента – полимербетона, а также уменьшение числа опор, что сокращает трудоемкость и сроки монтажа.

В Ростовском НИИ АКХ им. К. Д. Памфилова в 1970-х годах были разработан *пористо-трубчатый дренаж заземленного типа*. Принципиальное отличие конструкции заземленного дренажа от других пористых дренажных систем заключается в том, что положение гранул пористого слоя стабилизировано в пространстве путем их механического заземления без применения каких-либо связывающих веществ. Конструкция трубчатого дренажа с заземленным пористым слоем (рис. 2.62) состоит из системы труб диаметром 100–120 мм с продольными прямоугольными вырезами в нижней части. К ним жестко прикреплены (сваркой или хомутами) дрены – перфорированные трубы из коррозионно-стойкого материала, заполненные гранулами гравия, гранитного щебня или пластмассы расчетной крупности

Таким образом, дренаж защищен от пескования не наружными слоями гравия, а гранулами, размещенными внутри дрен. И что особенно важно, отсутствует одно из самых слабых звеньев пористых дренажей – связующее вещество.

Стенки дрен удерживают пористый слой в стабильном состоянии, препятствуя его расширению или смещению. Стабильность положения гранул пористого слоя в дренах сохраняется при условии: $d_0/D_{\text{экв}} \leq 0,75$, где d_0 – диаметр отверстий в дренах, мм; $D_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр гранул пористого слоя, мм. Для предотвращения суффозии частиц стандартных фильтрующих загрузок через дренаж крупность гранул в дренах не должна превышать 10 мм.

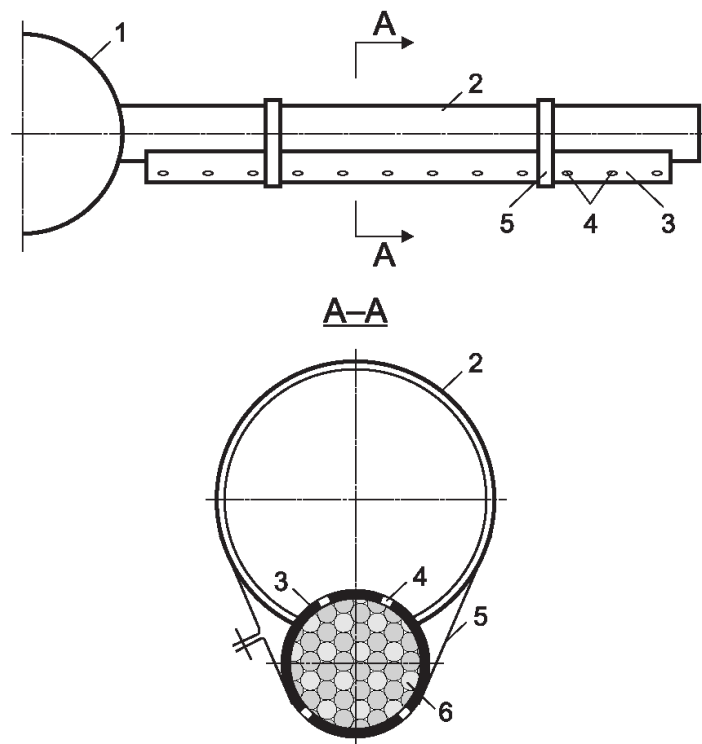


Рис. 2.62. Трубчатый дренаж с заземленным пористым слоем:

1 – коллектор; 2 – ответвление; 3 – дрена; 4 – отверстия; 5 – хомуты; 6 – пористый слой

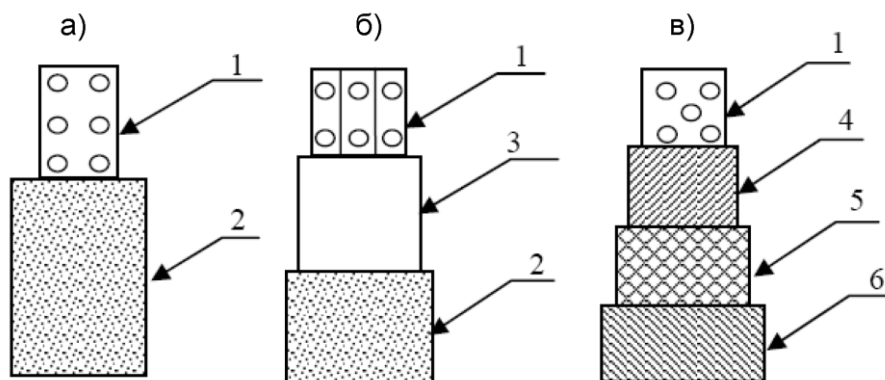


Рис. 2.63. Схемы трубчатых безгравийных дренажей:

а) «Экотон»; б) «Экополимер»; в) «Полисток»; 1 – перфорированная труба, 2 – слой наполненного полиэтилена. 3 – оплетка из синтетического материала, 4, 6 – внутренний и внешний стеклопластиковые каркасы, 5 – фильтрующая сетка.

Большее распространение получили *трубчатые безгравийные дренажи* на основе пористых полимерных материалов или сеток (рис. 2.63).

Например, трубофильтр «Экотон» конструктивно представляет собой трубчатое изделие, в котором перфорированный несущий каркас

(полиэтиленовая труба) меньшего диаметра размещен внутри волокнисто-пористой трубы с образованием воздушного зазора между ними (ЭФТ/В). Зазор между каркасом и фильтрующим элементом обеспечивает равномерное распределение воды и выравнивание давления по длине лучей дренажной распределительной системы. Поскольку при такой конструкции фильтрующий слой работает всей своей поверхностью, его собственное сопротивление практически не оказывает влияния на сопротивление системы в целом.

Производство трубофильтра осуществляется путем аэродинамического напыления расплава полимера на стандартную полимерную трубу или формообразователь заданного диаметра. Наслаиваемые волокна, сплавляясь между собой в местах соприкосновения, образуют при остывании волокнисто-пористый трубчатый элемент изделия с внутренним диаметром, равным наружному диаметру формообразователя. Толщина напыленного слоя регулируется временем его формирования. Плотность задается технологическими параметрами процесса.

Потери напора в дренажной системе Экотон составляют 2,2-3,2 м при интенсивности промывки до 18,5 л/(с•м²), В настоящее время конструкции дренажной системы марки ЭФТВ внедрены на многих водоочистных станциях и работают практически с любыми типами фильтрующей загрузки.

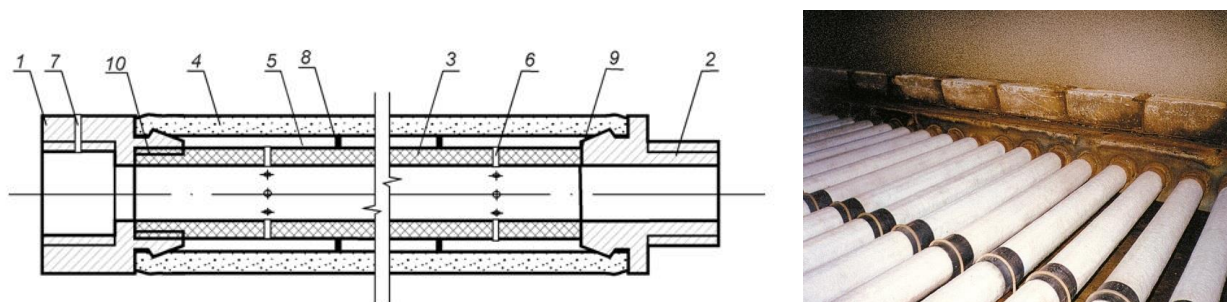


Рис. 2.64. Трубчатый дренажный элемент «Экотон» типа ЭФТ/В:

1 – муфта с внутренней резьбой; 2 – муфта с наружной резьбой; 3 – перфорированная труба; 4 – фильтрующий слой; 5 – воздушный зазор; 6 – отверстия для пропуска фильтрующей жидкости; 7 – отверстие для штифта; 8 – ребра жесткости; 9 – сварной шов; 10 – резьбовое соединение

Компанией «Экополимер» выпускаются фильтры дренажные (АФТ АПМ-ДФ), трубофильтры (АФТ АПМ-ТФ), аэраторы (АФТ АПМ-АФ), предназначенные для использования в дренажно-распределительных системах напорных и безнапорных фильтров с зернистой загрузкой, для установки в распределительные системы скорых безнапорных фильтров, напорных ионообменных или осветлительных фильтров с водяной и водовоздушной промывкой, а также для оборудования иловых и песковых площадок.

Устройство дренажного фильтра АФТ модификации АПМ-ДФ представлено на рис. 2.65. АФТ состоит из опорной трубы (каркаса), поверхность которой имеет двухслойное покрытие, наружный слой которого защитно-фильтрующий. Каркас АФТ имеет сложный геометрический профиль в виде чередующихся гребней и впадин. Потери напора при промывке составляют от 1 до 5 м.

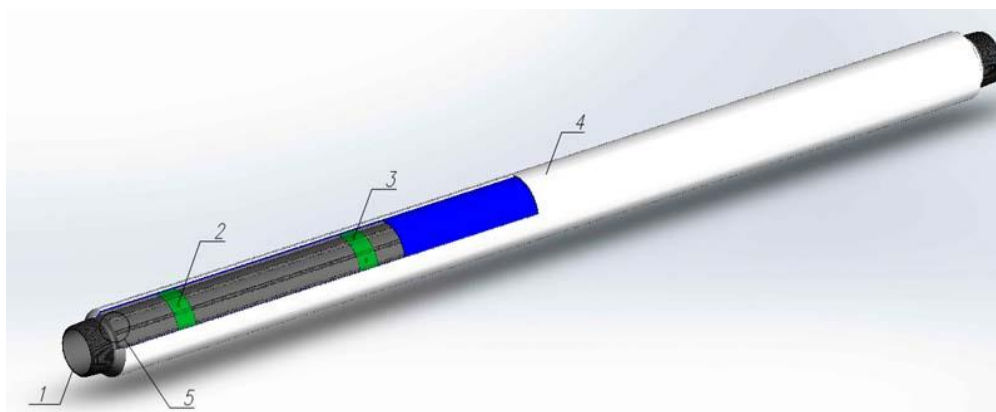


Рис. 2.65. Конструкция АФТ АПМ-ДФ:

1 – профилированная каркасная труба; 2 – водораспределительные отверстия; 3 – защитная сетка из нержавеющей стали (над створом отверстий); 4 – пористо-фильтрующее покрытие; 5 – продольные каналы сбора-распределения воды.

Трубофильтр АФТ АПМ-ТФ представляет собой профилированную трубу (1) с двумя симметричными линиями отверстий (2), которые расположены равномерно, в шахматном порядке вдоль ребер жесткости (рис. 2.66). Каркас

АФТ имеет сложный геометрический профиль в виде чередующихся гребней и впадин. Свободный конец АПМ-ТФ имеет приварную или резьбовую заглушку.



Рис. 2.66. Устройство трубофильтра АФТ АПМ-ТФ:

1 – профилированная труба; 2 – водораспределительные отверстия.

Дренажно-распределительные системы АФТ могут подключаться к водо- и/или воздухораспределительным коллекторам из полиэтилена и нержавеющей стали (рис. 2.67).

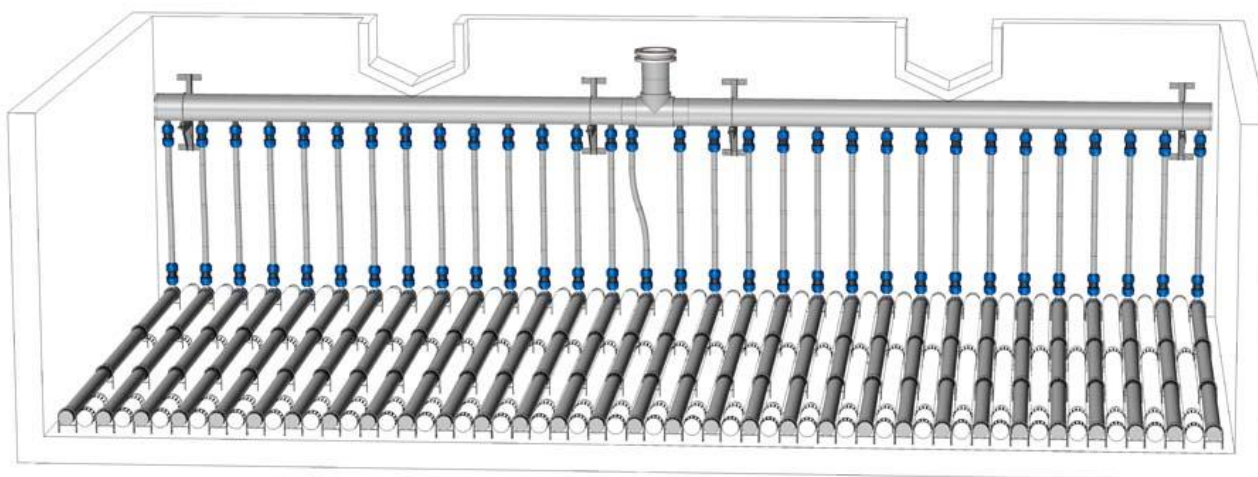
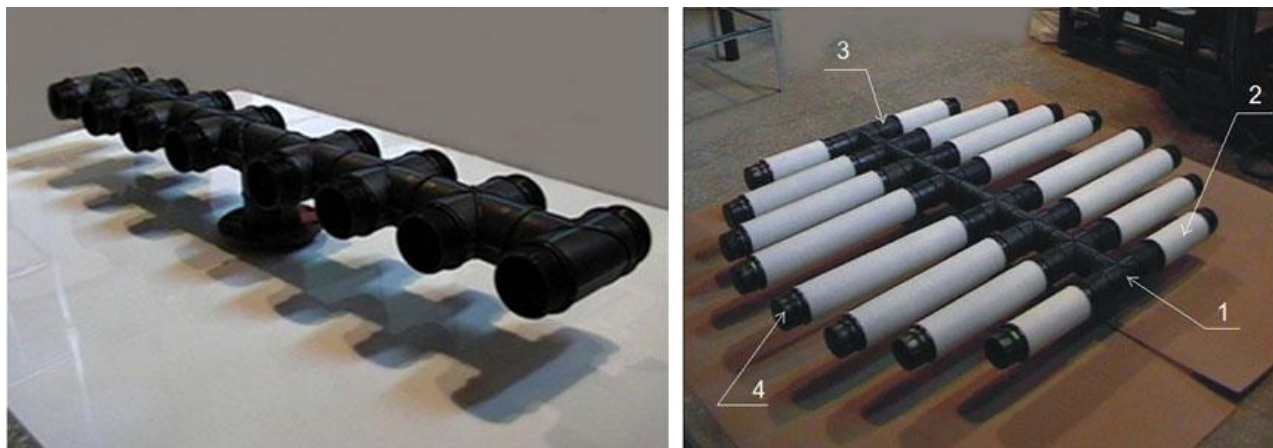


Рис. 2.67. Водо- и/или воздухораспределительные коллекторы

Дренажно-распределительные системы для напорных фильтров состоят из водораспределительного полиэтиленового коллектора и отходящих от него

лучей дренажных фильтров АФТ АПМ-ДФ-65 (рис. 2.68). Устройство дренажных фильтров аналогично дренажным фильтрам, которые используются в скорых безнапорных фильтрах.



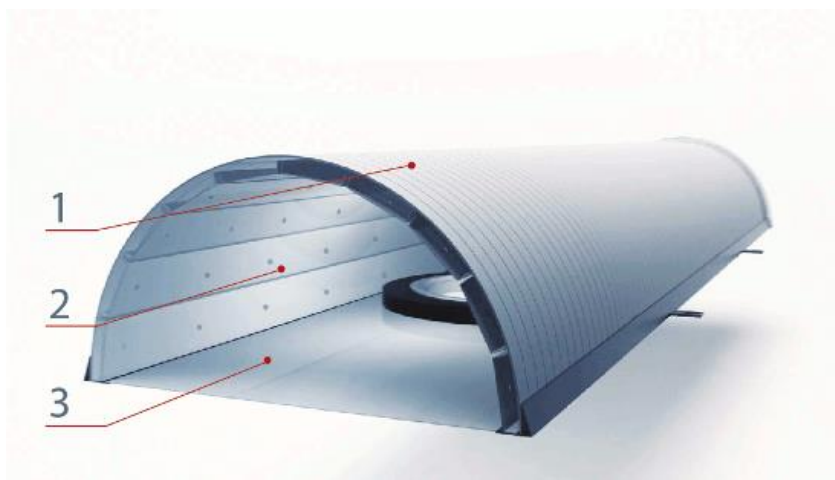
*Рис. 2.68. Распределительный полиэтиленовый коллектор для напорного фильтра Ø 2 м
1 - распределительный коллектор из полиэтилена; 2 - фильтр дренажный АФТ АПМ-ДФ-65; 3 - соединительная муфта; 4 - заглушка дренажного фильтра*

Развитием щелевого дренажа являются арочные конструкции из нержавеющей стали, например, дренажная система «Тритон» или «АКВАДЕФ-МТ». В основе щелевых дренажно-распределительных систем лежат щелевые решётки полуцилиндрической формы, выполненные из проволоки V-образного профиля из нержавеющей стали (рис. 2.69). Внутреннее распределительное устройство выполнено из перфорированных U-образных желобов для отвода воды и подачи водовоздушной смеси при промывке. В нижней части фильтрационной камеры имеется лоток для сбора фильтрованной воды и подачи водовоздушной смеси для промывки фильтров.

Преимущества такой дренажно-распределительной системы:

- равномерный сбор отфильтрованной воды по всей площади фильтра;
- эффективное распределение воды/воздуха в ходе обратной промывки;
- высокая коррозионная и механическая стойкость;

- предотвращение засорения и легкая очистка щелей за счёт V-образного профиля проволоки;
- минимальное гидравлическое сопротивление фильтроэлемента;
- не деформируется под действием силы, возникающей при обратной промывке;
- стабильный размер щели (не меняется в процессе эксплуатации);
- легкость в монтаже.



а)



б)

Рис. 2.69. Устройство (а) и внешний вид (б) арочного элемента щелевых дренажно-распределительных систем:

1 – щелевые решётки полуцилиндрической формы из нержавеющей стали; 2 - внутреннее распределительное устройство (перфорированные U-образные желоба); 3 - лоток для сбора фильтрованной воды и подачи водовоздушной смеси для промывки.

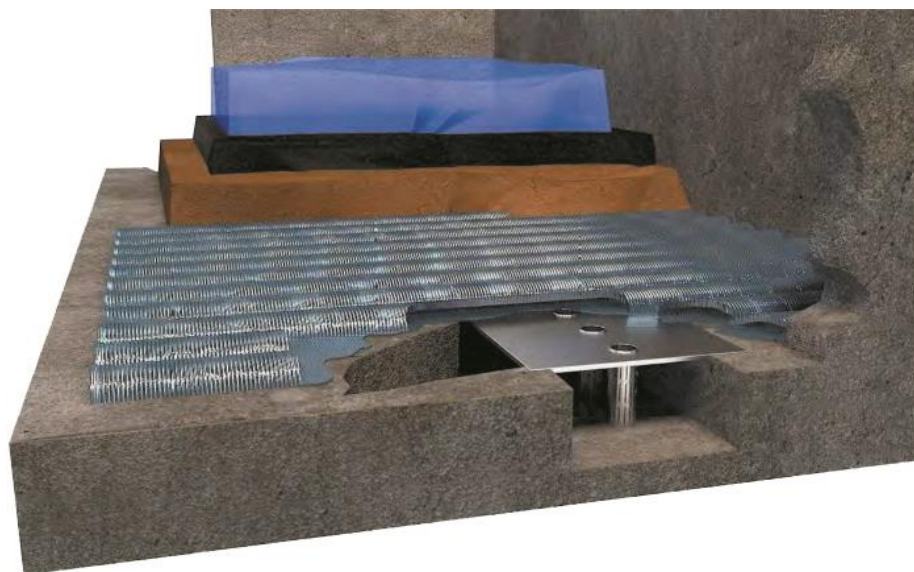


Рис. 2.70. Монтаж щелевой дренажно-распределительной системы.

Последние разработки в области щелевых дренажных систем – это система, производимая компанией «Leopold» (рис. 2.71), представляющая каналы прямоугольного сечения со встроенными щелевыми пластинами (т.н. покрытие I.M.S.), с камерами подачи и компенсации в пределах поперечного сечения одинарного блока. Используются два типа щелевых покрытий: I.M.S. 200 с перекрывающимися отверстиями размером 0,2 мм для подготовки питьевой воды с использованием фильтрующих загрузок с эффективным размером частиц более 0,45 мм и I.M.S. 1000 с отверстиями конической формы размером 1 мм для применения на очистных сооружениях сточных вод с использованием фильтрующих загрузок с эффективным размером частиц более 1,7 мм.

Отличительные особенности этой дренажной системы: равномерное распределение воздуха и воды, что гарантирует эффективную обратную промывку фильтра; отсутствие фальшпола и малое количество компонентов; малый вес и удобные защелкивающиеся соединения, что сокращает сроки монтажа системы.



a)



б)



в)

Рис. 2.71. Дренажные системы из щелеванных пластиковых элементов.

При расчете распределительных систем сопротивление фильтрующей загрузки обычно не учитывалось, что исключало возможность равномерного распределения промывной воды по площади фильтра. Поэтому при расчете распределительных систем большого сопротивления следует обязательно учитывать сопротивление загрузки при ее промывке.

Физическая сущность действия распределительных систем большого сопротивления заключается в том, что гидродинамическая неустойчивость взвешенного слоя загрязненной загрузки парализуется сопротивлением отверстий или щелей на пути движения воды. Для обеспечения равномерности распределения промывной воды по площади фильтра необходимо, чтобы суммарное сопротивление на пути потока промывной воды (сопротивление в распределительной системе сопротивление в загрузке) возрастало с увеличением интенсивности промывки. Математически это условие выражается уравнением

$$\frac{dH}{dw} \geq 0, \quad (2.45)$$

которое должно сохраняться при любых значениях интенсивности промывки – от нуля до заданного. В этом уравнении H – мгновенная потеря напора в загрузке и в отверстиях распределительной системы; w – мгновенная интенсивность промывки.

Расчеты, проведенные Е.А. Барановым, показали, что получаемые значения необходимой площади отверстий или щелей распределительной системы (для достижения равномерности распределения промывной воды) весьма близки к тем, которые установлены в процессе многолетней эксплуатации скорых фильтров и принимаются равными 0,2...0,25% от площади

фильтрующей поверхности. Эта норма принята и СНиПом при расчете площади отверстий и щелей распределительных устройств (для дренажной системы, фильтров АКХ эта норма составляет 1,5...2%), Размеры отверстий принимают 10...12 мм, а ширину щелей – по размеру наименьших фракций фильтрующей загрузки (обычно 0,4...0,5 мм). При определении числа дренажных колпачков следует иметь в виду, что площади щелей на серийно выпускаемых колпачках составляет: на колпачке ВТИ-2 – 240 мм² и на колпачке ВТИ-5 – 192 мм².

Диаметры трубопроводов распределительной системы подбирают по максимальной скорости движения воды в них 1,5...2 м/с, а диаметр дренажных труб, располагаемых в фильтрующей загрузке фильтров АКХ, ДДФ – по скорости движения воды не более 1 м/с.

Потеря напора в распределительной системе (в м) определяется по формуле

$$h = \zeta \frac{v_{\kappa}^2}{2g} + \frac{v_o^2}{2g}, \quad (2.46)$$

где ζ – коэффициент гидравлического сопротивления, принимаемый по СП; v_{κ} – скорость в начале коллектора, принимаемая при промывке 0,8 – 1,2 м/с; v_o – средняя скорость на входе в ответвления, принимаемая при промывке 1,6 – 2 м/с.

2.7.6. Современные конструкции фильтровальных аппаратов

В современной отечественной и зарубежной; практике используется много различных конструкций фильтровальных аппаратов с зернистой загрузкой. Основными тенденциями в их развитии являются: повышение надежности работы распределительной системы, отказ от применения поддерживающих

слоев загрузки, использование новых фильтрующих материалов с большей адгезионной способностью, отказ от устройства водосборных желобов и переход на боковой отвод промывной воды, применение водовоздушной промывки, устройство фильтрующих загрузок повышенной грязеемкости.

На рис. 2.72 показаны схемы открытых скорых фильтров с боковым карманом.

При площади одного фильтра более 30 м² его делят на две равные части распределительным каналом. Этот канал по высоте разбит на два изолированных друг от друга яруса. Через верхний ярус производится подача осветляемой воды и отвод загрязненной промывной воды, а через нижний — отвод фильтра и подвод вниз фильтра промывной воды.

На рис. 2.73 изображен *напорный скорый фильтр*, серийно выпускаемый нашей промышленностью. Наибольший диаметр напорного фильтра из условий удобства перевозки железнодорожным транспортом принят 3,4 м. Подача осветляемой воды и отвод промывной осуществляется через центрально расположенную воронку, обращенную широким концом кверху, или кольцевой перфорированный трубопровод. Фильтр не имеет поддерживающих слоев и фильтрующий материал располагается непосредственно на колпачковом или щелевом дренаже. Промывка загрузки предусмотрена водовоздушная, для чего, фильтр снабжен специальной распределительной системой для подачи во время промывки сжатого воздуха. Эта распределительная система располагается в фильтрующей загрузке над основным дренажем фильтра. Загрузка фильтра производится через верхний лаз. Для гидравлической выгрузки фильтрующей загрузки предусмотрен специальный разгрузочный штуцер. На рис. 2.73, б показан фильтр с загрузкой из вспененного полистирола.

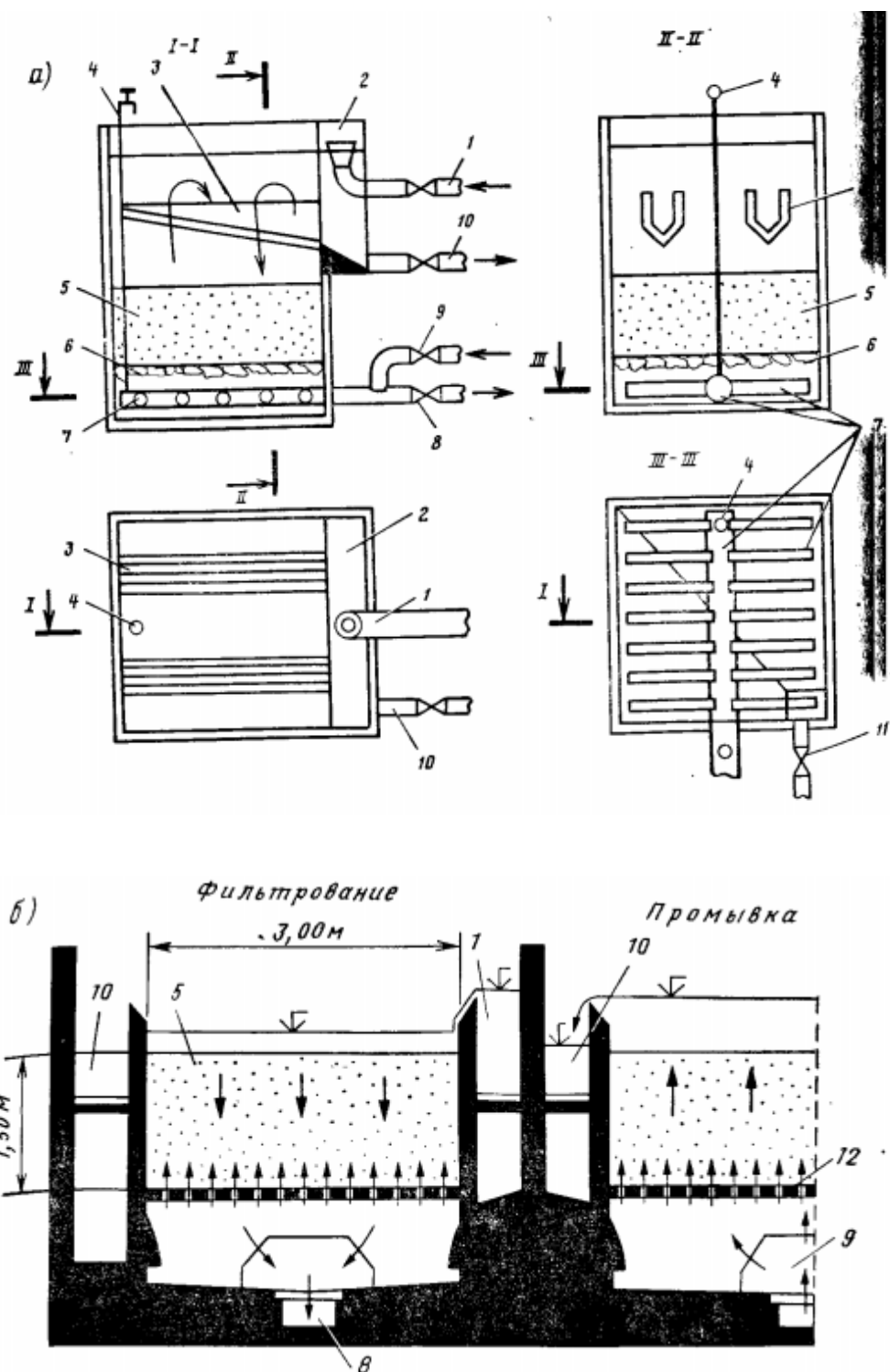


Рис. 2.72. Схема открытого (безнапорного) скорого фильтра с боковым карманом (а) и боковым отводом промывной воды (б):

1, 8 - подача исходной воды и отвод фильтрата; 2 - боковой карман; 3 - водосборные желоба; 4 - воздушник, 5 - фильтрующая загрузка (кварцевый песок, керамзит, шунгизит и др), 6 - поддерживающий слой гравия (щебня); 7 - распределительная система магистральная труба (или канал) и перфорированные ответвления, 9, 10 - подача и отвод промывной воды, 11 - водосток; 12 - колпачковая распределительная (дренажная) система

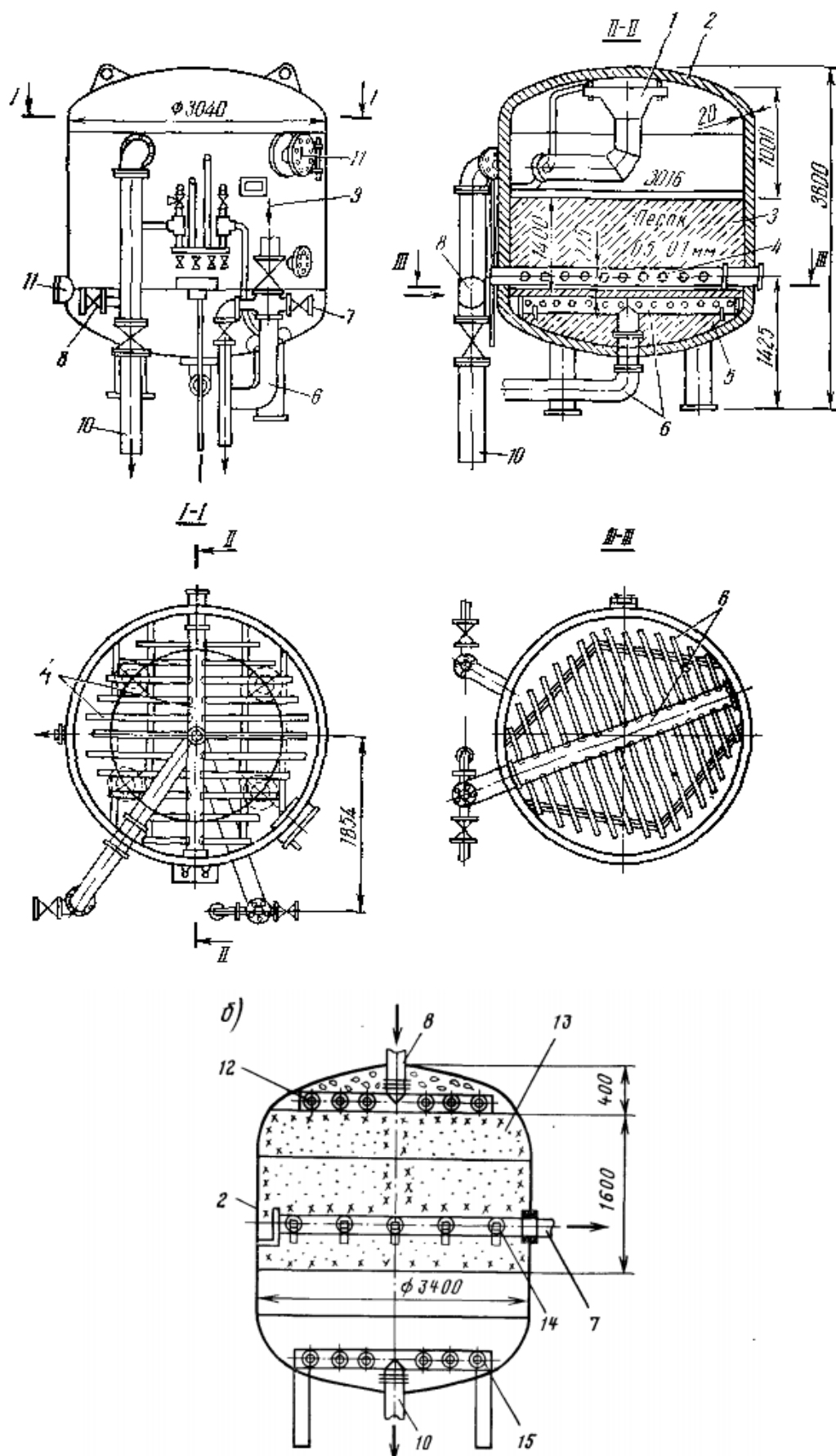


Рис. 2.73. Вертикальные напорные скорые фильтры с керамзитовой (а) и пенополистирольной (б) загрузкой

Нашей промышленностью серийно выпускаются напорные вертикальные фильтры пяти типоразмеров. Высота фильтрующей загрузки в фильтрах всех размеров принята 1-2 м. Наибольший диаметр напорного фильтра из условий удобства перевозки железнодорожным транспортом принят 3,4 м, фильтрующая площадь такого фильтра составляет 7,1 м². Поэтому при более или менее значительной производительности водоочистной установки приходится устраивать большое число фильтров и арматуры, что удорожает строительство и усложняет эксплуатацию фильтров. Число устанавливаемых напорных фильтров может быть сокращено примерно в 4 раза в случае применения горизонтальных напорных фильтров, площадь фильтрования которых составляет 28...30 м², или вертикальных двух — и трехкамерных фильтров.

Фильтры с плавающей загрузкой (ФПЗ) являются эффективными, высокопроизводительными сооружениями по очистке природных, оборотных и сточных вод от гетерофазных примесей. Применение плавающих полимерных гранульных загрузок с плотностью меньшей плотности воды открыло новые перспективы в совершенствовании и интенсификации работы зернистых фильтров. Плавающая загрузка в работе не имеет непосредственного контакта с нижней дренажной системой сбора и отвода промывной вод. Это позволяет отказаться от применения в корпусах фильтров дренажа большого сопротивления и специальных промывных насосов, уменьшить материалоемкость сборно-распределительных систем и рационально использовать весь располагаемый напор над коллектором отвода промывной воды.

Расходы на доставку пенополистирольной загрузки к объектам сокращаются в 15...25 раз по сравнению с тяжелыми загрузками; так как из 1 т исходного сырья на месте применения можно получить более 15 м³ плавающей загрузки. В отличие от промывки тяжелых фильтрующих материалов, вектор

силы тяжести, задержанных в порах загрузки загрязнений, совпадает с вектором движения промывного потока, поскольку промывка плавающей загрузки осуществляется сверху вниз водой из надфильтрового пространства, повышая эффективность отмывки загрузки и сокращая ее продолжительность.

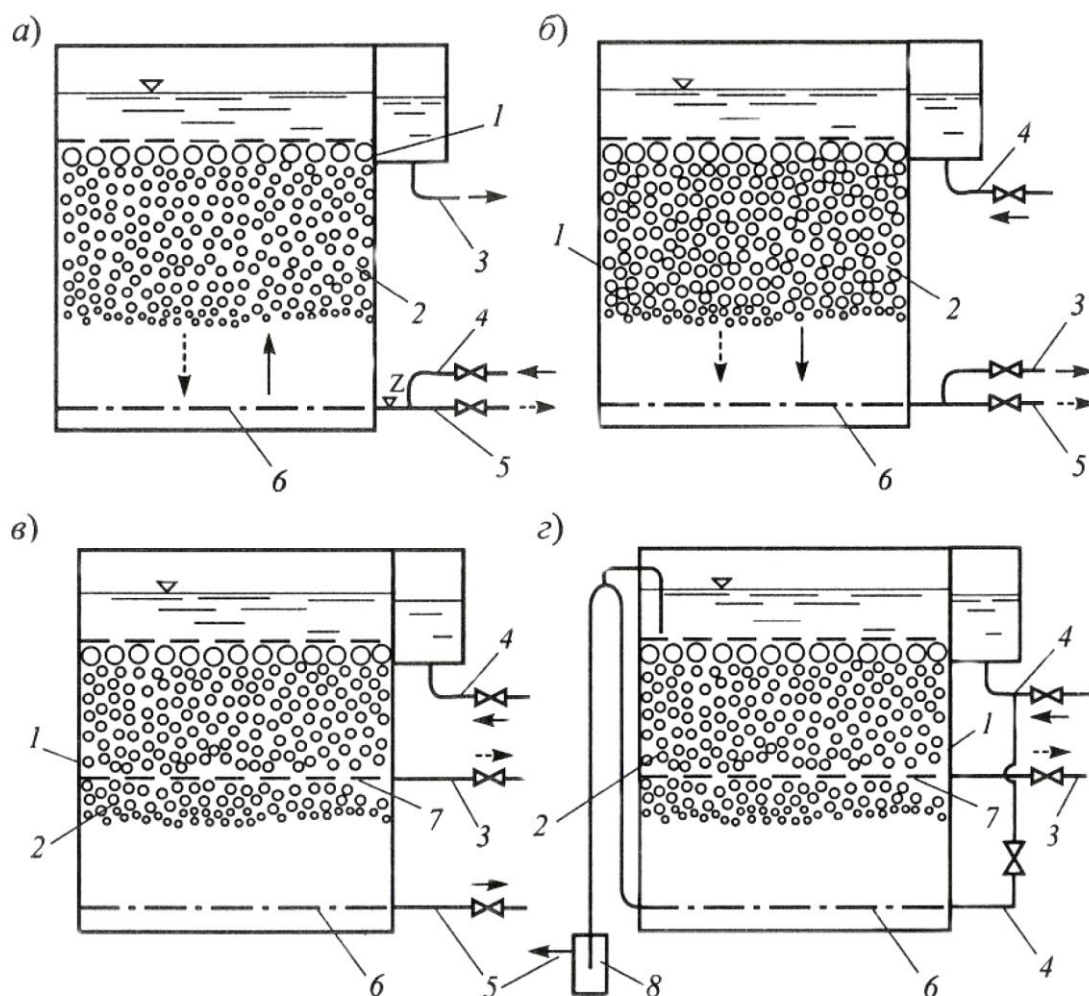


Рис. 2.74. Конструкции ФПЗ-1 (а), ФПЗ-3 (б), ФПЗ-4 (в), АФПЗ-5м (г):

1 – корпус; 2 – фильтрующая загрузка; 3 – отвод фильтрата; 4 – подача исходной воды; 5 – отвод промывной воды; 6 – нижняя дренажная система (НДС); 7 – средняя дренажная система (СДС),
8 – система гидроавтоматической промывки

К категории плавающих фильтрующих зернистых загрузок относятся полимерные гранулы или зерна с замкнуто-ячеистыми порами диаметром 0,5...6,0 мм, а также полимерные волокна с плотностью меньшей плотности воды, способные пребывать в затопленном водой состоянии неограниченное

время. Наиболее приемлемыми для практики являются вспененные гранулы полистирола марок ПСВ и ПСВ-С, а также их модификации. В качестве плавающих загрузок могут применяться и гранулированный стеклопор, дробленые пенополиуретан и пенопропилен, фторопласт, капрон, полиэтилен и другие легкие полимерные материалы.

Наиболее экономичными и простыми в эксплуатации являются фильтры с восходящим фильтрационным потоком и относительно однородной пенополистирольной загрузкой (ФПЗ-1) с диаметром гранул рабочего слоя 0,7-1,5 мм и поддерживающим верхним слоем, состоящим из гранул диаметром 2,5-6,0 мм.

Напорные фильтры АКХ серийно выпускает наша промышленность тех же пяти диаметров, что и обычных напорных фильтров. Для улучшения условий промывки предусмотрен подвод в фильтры сжатого воздуха, который равномерно распределяется с помощью распределительной системы, расположенной в загрузке непосредственно над нижним дренажем. Фильтры не имеют поддерживающих слоев, вследствие чего нижний дренаж выполняют в виде ряда распределительных труб с щелевыми колпачками.

Выпускают также *горизонтальные напорные фильтры АКХ*, близкие по конструктивному оформлению к фильтрам системы А. Г. Туганова, но с двухпоточным фильтрованием – снизу и сверху. Фильтры имеют диаметр 3 м, высоту нижнего слоя – 1,08 м, верхнего – 0,5 м, длину 10...16 м, площадь фильтрования ~30 м².

Более простыми являются *фильтры с двухслойной загрузкой*. В конструктивном отношении они не отличаются от обычных скорых фильтров, и двухслойная загрузка может быть применена в обычном скором фильтре без какой-либо дополнительной конструктивной переделки.

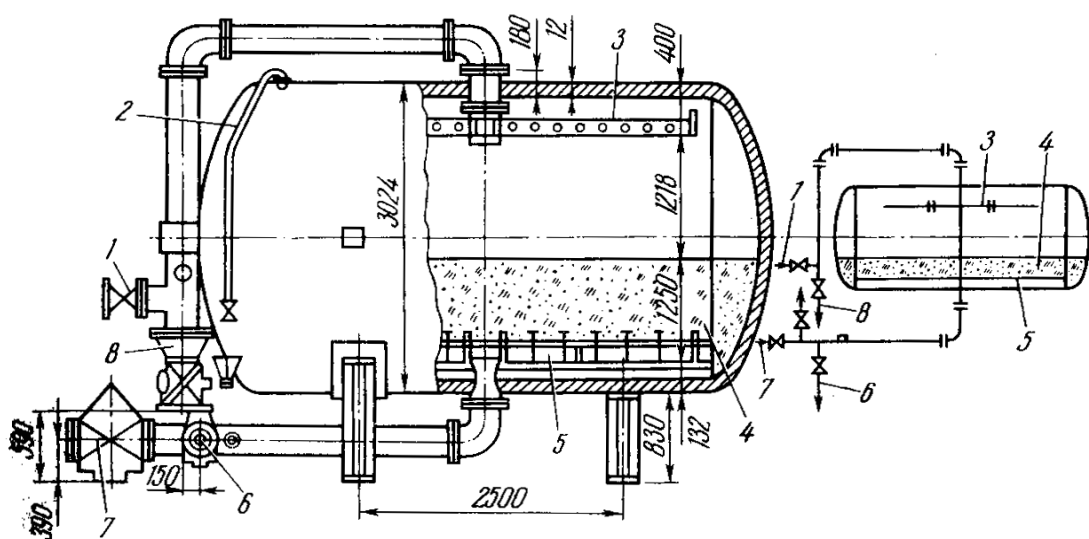


Рис. 2.75. Горизонтальный напорный фильтр системы А.Г. Туганова:

1, 6 – подача исходной воды и отвод фильтрата; 2 – воздушник; 3, 5 – водораспределительная и дренажная система; 4 – фильтрующая загрузка; 7, 8 – подача и отвод промывной воды

При подготовке питательной воды ТЭС применяют фильтры АКХ с загрузкой из *термоантрацита*, который получают путем термической обработки антрацита, без доступа воздуха в шахтных печах при температуре свыше 1000 °С. В этих условиях антрацит лишается влаги, летучих и части пиритной серы; одновременно возрастает плотность антрацита (до 1,8) и его механическая прочность.

В схемах технического водоснабжения значительное распространение получили *каркасно-засыпные фильтры* и *напорные сверхскоростные осветлительные фильтры* системы Г. Н. Никифорова.

Каркасно-засыпные фильтры имеют загрузку в виде каркаса из гравия или щебня толщиной 2 м и засыпки из песка (керамзита, антрацита, шлака) толщиной 1 м, заполняющей часть порового пространства. Скорость фильтрования до 20 м/ч. Промывка водовоздушная. Фильтры системы Г.Н.Никифорова фильтруют воду со скоростью до 100 м/ч. Фильтр представляет собой цилиндрический корпус с круглой камерой внутри. Пространство между этими цилиндрами разделено вертикальными

перегородками на восемь отсеков – фильтров с песчано-гравийной загрузкой. В работе находятся семь отсеков, а один – на промывке. Продолжительность фильтроцикла в каждом отсеке не превышает одного-двух часов. Учитывая, что производительность фильтра лимитируется его размерами и при диаметре 3 м не превышает 150 м³/ч, Г.Н. Никифоров предложил батарейный тип сверхскоростных напорных фильтров с автоматической системой промывки. Все фильтры, входящие в блок, связаны единым гидравлическим режимом.

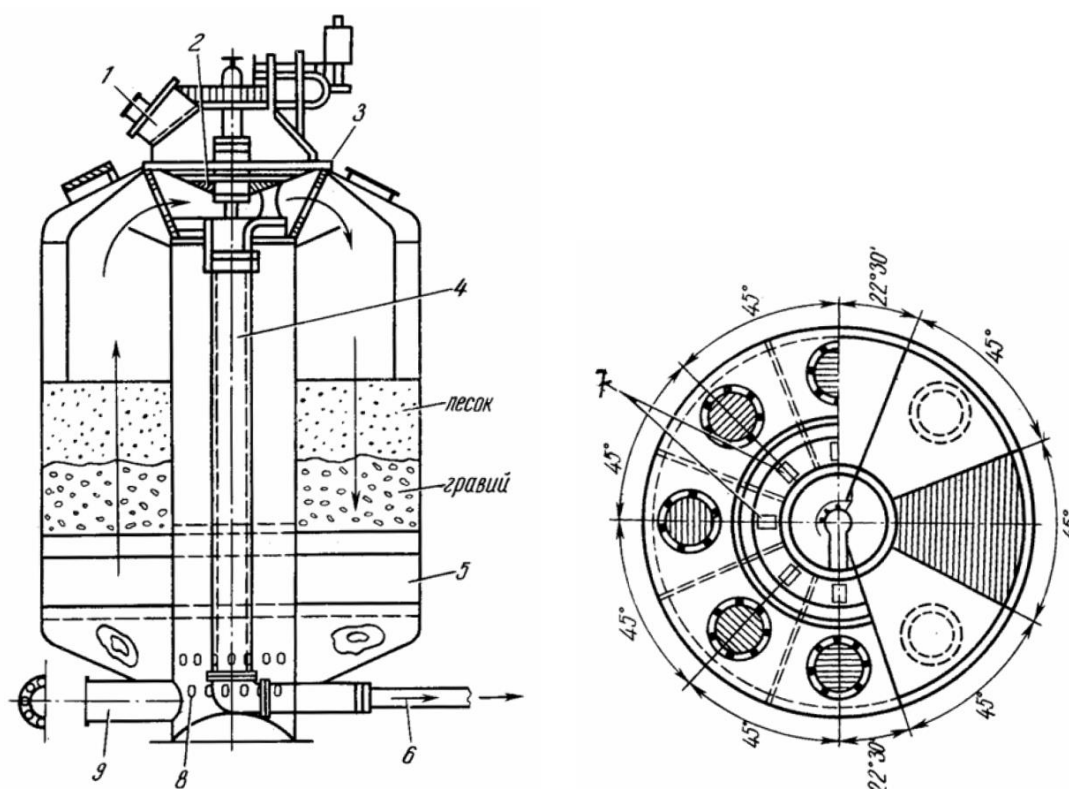


Рис. 2.76. Схема сверхскоростного фильтра конструкции Г.Н. Никифорова:

5 – поддон; 2 – распределительное устройство; 3 – вращающийся патрубок; 6, 5 – отвод и подача промывной воды через поддон 5; 4 – центральный стояк; 7 – щели подачи исходной воды; 1, 9 – подача исходной и отвод фильтрованной воды; 8 – отверстия для сбора фильтрата

В водоподготовке также применяются напорные скорые фильтры. Серийно выпускаются напорные вертикальные фильтры восьми типоразмеров (диаметром от 1-3,4 м). Высота фильтрующей загрузки в фильтрах всех размеров принята 1,2 м. Подача осветленной воды и отвод промывной

осуществляется через центрально расположенную воронку, обращенную широким концом кверху, или кольцевой перфорированный трубопровод. Фильтр не имеет поддерживающих слоев, и фильтрующий материал располагается непосредственно на колпачковом или щелевом дренаже. Промывка загрузки предусмотрена водовоздушная, для чего фильтр снабжен специальной распределительной системой для подачи во время промывки сжатого воздуха. Эта распределительная система располагается в фильтрующей загрузке фильтра. Загрузка фильтра производится через верхний лаз. Для гидравлической выгрузки фильтрующей загрузки предусмотрен специальный разгрузочный штуцер.

Наибольший диаметр напорного фильтра из условий удобства перевозки железнодорожным транспортом принят 3,4 м, фильтрующая площадь такого фильтра составляет 7,1 м². Поэтому при значительной производительности водоочистной установки приходится принимать большое число фильтров и арматуры, в связи с чем удорожается строительство и усложняется эксплуатация фильтров. Число фильтров может быть сокращено примерно в четыре раза при установке горизонтальных напорных фильтров, площадь фильтрования которых составляет 28-30 м², или вертикальных двух- или трехкамерных фильтров.

Фильтры с крупнозернистой загрузкой для частичного осветления воды конструктивно аналогичны обычным скорым фильтрам. Фильтрующая загрузка однослойна. Для песка крупность зерен принимается 1...2 или 1,6...2,5 мм соответственно, высота фильтрующего слоя 1,5...2,0 и 2,5...3 м, скорость фильтрования 10...12 и 13...15 м/ч. Режим промывки следующий: взрыхление загрузки воздухом 15...25 л/(с·м²) в течение 1 мин, водовоздушная промывка 3,5...5 л/(с·м²) воды и 15...25 л/(с·м²) воздуха в течение 5 мин, отмывка водой 7,1...9 л/(с·м²) в течение 3 мин.

2.8. Контактные осветлители и контактные фильтры

Разновидностью фильтровальных аппаратов являются контактные осветлители, работающие по принципу фильтрования воды снизу вверх в направлении убывающей крупности зерен фильтрующей загрузки большой толщины.

При водообработке на контактных осветлителях (КО) коагулянт вводят в воду непосредственно перед ее поступлением в загрузку аппаратов, процесс коагуляции происходит в ее толще. За короткий промежуток времени от момента введения коагулянта до начала фильтрования в воде могут образоваться лишь микроагрегаты коагулирующих частиц. Дальнейшая агломерация примесей происходит не в свободном объеме воды, а на зернах загрузки КО; частицы адсорбируются на поверхности зерен, образуя отложения характерной для геля сетчатой структуры. Такой процесс является контактной коагуляцией, что обусловливается контактом воды, содержащей коагулированные примеси, с поверхностью зерен контактной массы.

Как показали исследования и практика, процесс контактной коагуляции идет с большей полнотой и во много раз быстрее, чем конвективной коагуляции в объеме; доза коагулянта, как правило, меньше, чем доза, необходимая для коагулирования примесей в свободном объеме. Для протекания процесса контактной коагуляции необходимо ввести в воду такую дозу коагулянта, при которой частицы примесей теряют свою агрегативную устойчивость в отношении прилипания к поверхности зерен контактной массы. Такие дозы обычно недостаточны для того, чтобы обеспечить быстрое хлопьеобразование в свободном объеме с получением тяжелых, хорошо декантирующих хлопьев. Кроме того, при контактной коагуляции на процессе почти не влияют температура воды и ее анионный состав, наличие грубодисперсных взвесей и ее щелочность. Отпадает необходимость в перемешивании воды для обеспечения протекания ортокинетической фазы

коагулирования примесей. Однако быстрота и равномерность распределения коагулянта в обрабатываемой воде имеют решающее значение.

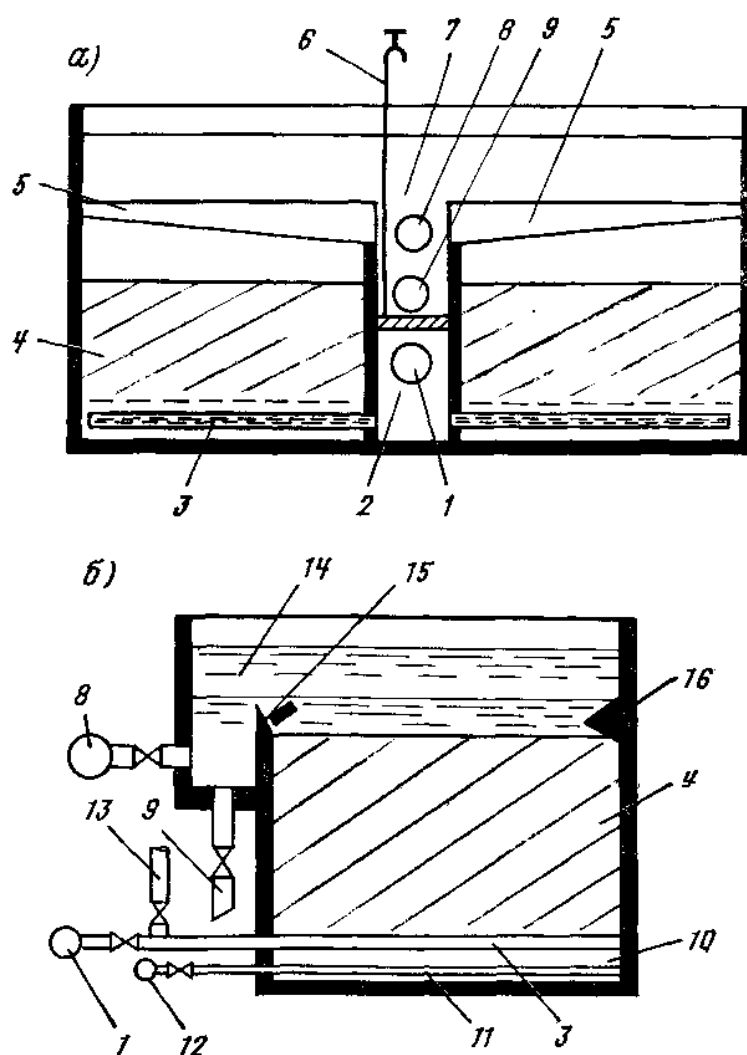


Рис. 2.77. Контактные осветлители КО-1 (а) и КО-3 (б):

1 – подача исходной воды; 2, 7 – нижнее и верхнее отделения центрального канала; 3 – водораспределительная система; 4 – слой песка; 5 – водосборный желоб; 8 – отвод фильтрата; 9 – отвод промывной воды; 10 – слой гравия; 11 – воздухораспределительная система; 12 – подача воздуха на промывку; 13 – подача промывной воды; 14 – боковой карман; 15 – пескоулавливающий желоб; 16 – струенаправляющий выступ

Благодаря этому в условиях обработки маломутных цветных вод КО весьма удачно заменяют обычную двухступенчатую очистку воды, обеспечивая высокий эффект осветления и обесцвечивания при одновременном снижении

стоимости строительства и эксплуатации очистных сооружений. На водоочистных комплексах с КО необходимо предусматривать барабанные сита или микрофильтры и (вертикальный) смеситель для воздухоотделения и смешения реагентов с водой. Микрофильтры и барабанные сита располагают обычно над смесителем или входной камерой.

При использовании контактных осветлителей основная масса примесей воды задерживается в нижних – крупнозернистых слоях, характеризующихся большой грязеемкостью, что уменьшает темп прироста потери напора. Снижение темпа прироста потери напора и увеличение продолжительности защитного действия загрузки вследствие большой высоты слоя позволяет очищать на КО воду с содержанием взвеси, значительно превышающим обычно допустимое для скорых фильтров. Скорые фильтры могут работать нормально, если содержание взвеси в поступающей на них воде составляет 5-15 мг/л. Контактные же осветлители работают нормально при содержании взвеси в очищаемой воде до 70 мг/л и ее цветности до 70 град. ПКШ.

Распределительная система контактного осветлителя трубчатая, большого сопротивления, с поддерживающими слоями или без них.

Контактные осветлители рекомендуется использовать без поддерживающих слоев при промывке водой и с поддерживающими слоями при водовоздушной промывке. Разработаны три модели КО. Осветлитель КО-1 представляет собой резервуар, заполненный загрузкой из песка и гравия. Песок не должен содержать фракции крупнее 2 мм и мельче 0,7 мм. Средний диаметр песка 0,9...1 мм, $d_{эжв} = 1...1,3$ мм, толщина слоя песка около 2 м. Гравийные слои располагают под песчаной загрузкой на дне контактного осветлителя, они имеют общую толщину 0,6-0,8 м. Рекомендуемая высота и крупность песчаных и гравийных слоев приведены в СП 31.13330.2012. Расчетную скорость фильтрования для КО-1 принимают 4,0...5,5 м/ч. Очищаемую воду предварительно смешивают с коагулянтом и вводят в загрузку с помощью распределительной системы из дырчатых труб, уложенных на дне в слое

мелкого гравия (2-10 мм). Распределительная система служит и для подачи промывной воды. Промывку с интенсивностью 15-18 л/(с·м²) в течение 7-8 мин производят так же, как и обычных скорых фильтров. Осветленная вода, как и промывная, отводится с помощью желобов, расположенных над песком.

В безгравийных КО-1, промываемых водой, устраивают безгравийную трубчатую распределительную систему с приваренными вдоль дырчатых труб боковыми шторками, между которыми приваривают поперечные перегородки, разделяющие подтрубное пространства на ячейки. КО-3 с поддерживающими слоями и водовоздушной промывкой имеет трубчатые распределительные системы для подачи воды и воздуха и систему горизонтального отвода промывной воды.