Глава 1. Состав природных вод. Основные методы и технологические схемы кондиционирования

1.1. Состав природных вод

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 содержаться 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.

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 способность его растворяться.

В случае малых значений ПР полнота очистки воды возрастает, особенно при избытке иона-осадителя. Присутствие в воде посторонних солей обусловливает увеличение ионной силы раствора (ионная сила является мерой напряженности электрического поля, создаваемого присутствующими в растворе ионами), вследствие чего уменьшаются коэффициенты активности реагирующих ионов и растворимость осадков возрастает.

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 °С). Подземные воды имеют более стабильную температуру (8-12 °С). Наиболее приемлемая для питьевых нужд является вода с температурой 7-11 °С.

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 превышать 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 2.1.4.1074-01 «Питьевая вода» количество взвешенных веществ в питьевой воде не должно превышать 1,5 мг/л.

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.

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 для измерения оптической плотности.

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 (соленый), 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 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 лимитируется, также в воде, поступающей для питания паровых котлов, и в воде, используемой в производстве киноплёнки, синтетического каучука и др.

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.

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

Жесткая вода непригодна для питания котлов, паросиловых установок тепловых электростанций и теплоэлектроцентралей. Жесткость воды лимитируется для предприятий бумажной, текстильной промышленности, при производстве искусственного волокна и др.

Железо и марганец присутствую 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. Содержание железа и марганца ограничивают в воде, используемой при производстве пластмасс, кино- и фотопленки, бумаги, в текстильной, пищевой промышленности и др.

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. Для вод большинства природных источников значение pH не отклоняется от указанных пределов.

Окисляемость воды обусловливается 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 2.1.4.1074-01 ограничивает окисляемость питьевой воды до 5 мг O_2/л. Характерно, что окисляемость воды после коагулирования, отстаивания и фильтрования снижается меньше, чем цветность.

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 и нитритов. В соответствии с СанПиН в питьевой воде допускается 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 придают воде 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.

Азот в природные воды поступает из воздуха, 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.

Бактерии и вирусы могут интенсивно развиваться в воде. В соответствии с СанПиН 2.1.4.1074-01 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 – отсутствие в 100 мл; колифаги – отсутствиие бляшкообразующих единиц (БОЕ) в 100 мл;

При обнаружении в повторной пробе воды выше перечисленных 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).

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

Здесь перечислены лишь основные свойства природных вод. В практике приходится встречаться еще с целым рядом специфических свойств природных вод. Например, питьевая вода не должна содержать более 0,05 мг/л мышьяка, 1 мг/л меди, 5 мг/л цинка, 0,03 мг/л свинца, и 0,5 мг/л алюминия.

1.2. Требования к качеству очищенной воды для различных категорий водопотребителей

Основными показателями, определяющими пригодность воды для разных категорий водопотребителей, является 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 2.1.4.1074-01. В мировой практике используются нормативы всемирной организации здравоохранения ВОЗ и развитых государств с высоким научно-техническим потенциалом: США, Франции, Германии и др.

Питьевая вода должна быть безопасна в эпидемическом и радиационном отношении, безвредна по химическому составу, и иметь удовлетворительные органолептические свойства.

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 2.1.4.1074-01. 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 соблюдении этого требования допускается кратковременно 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 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.

1.3. Основные методы и технологические схемы кондиционирования

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:*

- 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 и *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 дистилляцию;
- 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.

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.

Таблица 1

Водоочистные процессы для извлечения различных групп примесей

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

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, обусловливающие 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.

Таблица 2

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

Качество исходной воды			Производительность станций*, $м^3$/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
Реагентные технологии				
<30…50	<150	>50	5000-10000	реагентное хозяйство-скорые напорные фильтры-обеззараживание
<120	<150	>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

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 ниже.

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.м^3/сут. Осветлители со взвешенным осадком применяются на станциях любой производительности при соответствующем технико-экономическом обосновании.

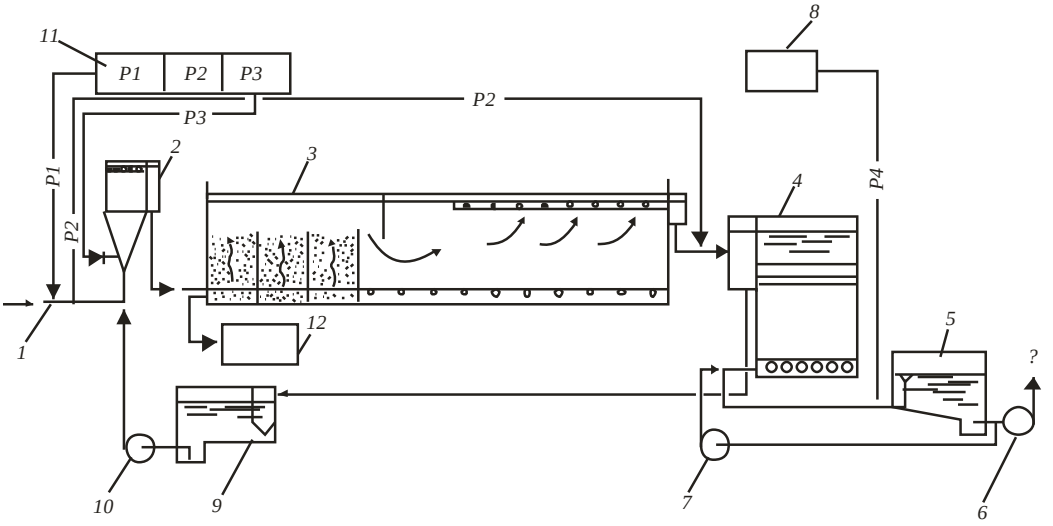

Рис. 1.1. Технологическая схема подготовки питьевой воды с горизонтальными отстойниками и скорыми фильтрами:
1 – подача исходной воды; 2 – смесители вихревые; 3 – отстойники горизонтальные со встроенной камерой хлопьеобразования; 4 – скорые фильтры; 5 – резервуары чистой воды; 6 – насосная станция II подъема; 7 – промывные насосы; 8 – хлораторная; 9 – резервуары усреднители; 10 – насосы для подачи промывной вды на повторное использование; 11 – реагентные хозяйства; 12 – сооружения для обработки осадка; р1 – коагулянт; р2 – флокулянт; р3 – подщелачивающий реагент; р4 – хлор

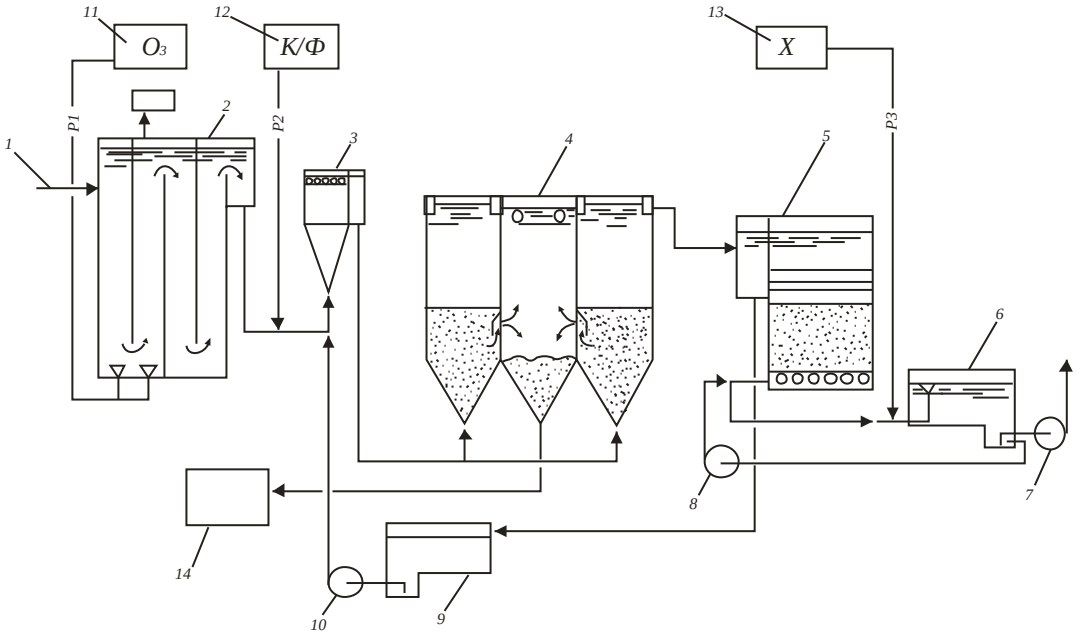

Рис. 1.2. Технологическая схема подготовки питьевой воды с осветлителями со взвешенным осадком и скорыми фильтрами:
1 – подача исходной воды; 2 – контактные резервуары; 3 - смесители вихревые; 4 – осветлители со взвешенным осадком; 5 – скорые фильтры; 6 – резервуары чистой воды; 7 – насосная станция II подъема; 8 – промывные насосы; 9 – резервуары усреднители; 10 – насосы для подачи промывной воды на повторное использование; 11 – озонаторная; 12 – реагентное хозяйство; 13 – хлораторная; 14 – сооружения для обработки осадка; р1 - озон; р2 – коагулянт; р3 – хлор

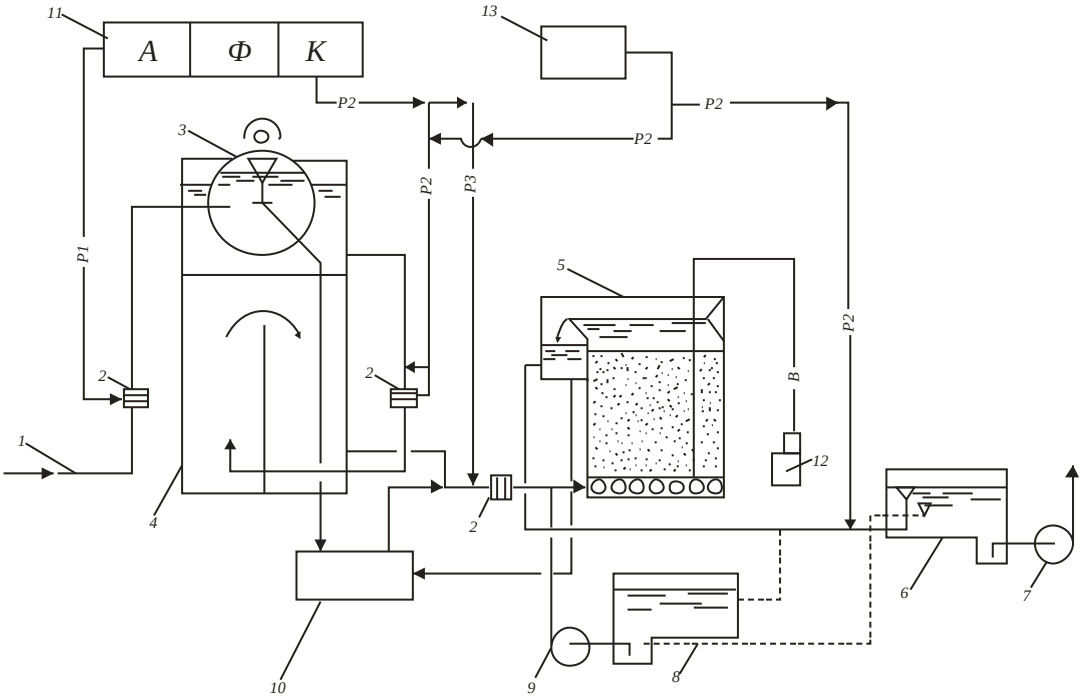

Рис. 1.3. Технологическая схема подготовки питьевой воды с контактными осветлителями: 1 – подача исходной воды; 2 – смесители шайбовые; 3 – барабанные сетки или микрофильтры; 4 – контактные резервуары; 5 – контактные осветлители; 6 – резервуары чистой воды; 7 – насосная станция II подъема; 8 – хлораторная; 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

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 120 мг/л и цветности до 150 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.

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.

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, выражаемых в мг/л: Fe, Mn, H_2S, $CO_{2,св}$, F, $S0_4^{2-}$, pH, $Ж_к$ (мг-экв/л) и перманганатная окисляемость ($мгO_2$/л). Пример технологической схемы кондиционирования подземной воды приведен ниже.

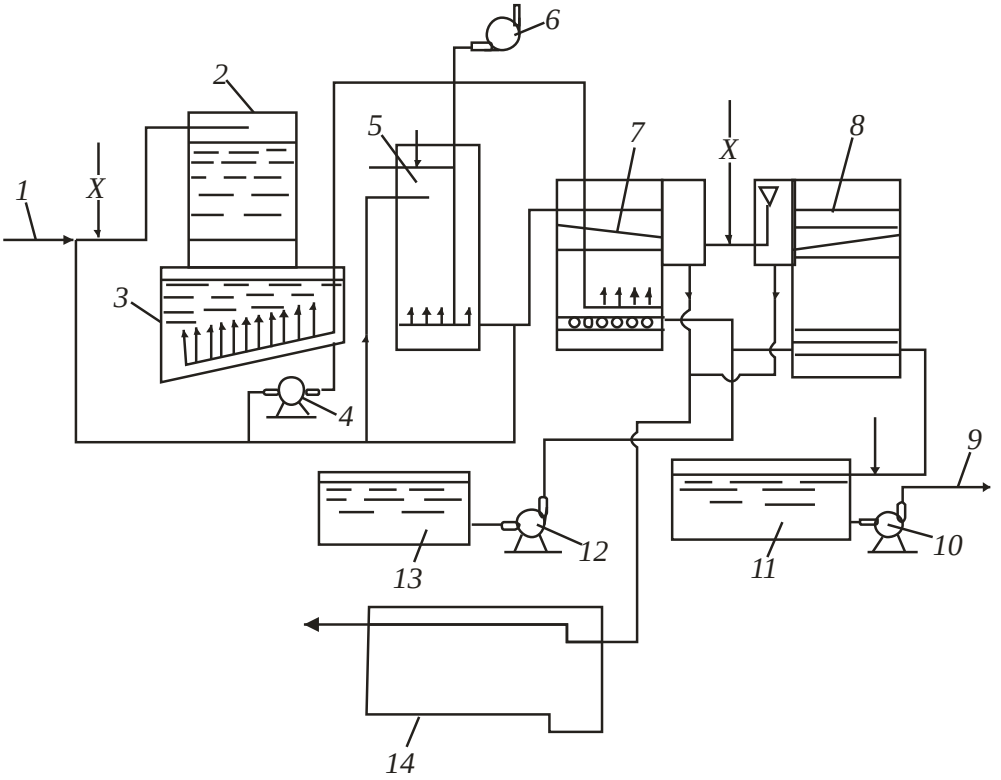

Рис. 1.4. Технологическая схема кондиционирования подземных вод сложного состава: 1 и 9 – подача и отвод обработанной воды; 2 – аэратор – дегазатор; 3 – отстойник; 4 – насос подкачки; 5 – аэратор-смеситель; 6 – компрессор; 7 – осветлительный фильтр; 8 – сорбционный фильтр; 10 – насосная станция II подъема; 11 – РЧВ; 12 – промывной насос; 13 – резервуар промывной воды; 14 – резервуар сбора промывных вод после фильтров; X – ввод хлора

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*.

Глава 2. Коагулирование примесей воды

2.1. 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.

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, 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. Скачок потенциала на границе плотного и диффузного (размытого) слоев противоионов указывает на соотношение полного (φ_o) и электрокинетического (ξ) потенциалов заряженной мицеллы.

Используемые в практике коагулянты – чаще всего являются солями слабых оснований и сильных кислот: $Al_2(SO_4)\cdot nH_2O$, $Fe_2SO_4\cdot nH_2O$, $FeCl_3\cdot nH_2O$. Гидролиз солей протекает в несколько стадий:

$$Al^{3+} + 3H_2O \Leftrightarrow Al(OH)_3 \downarrow + 3H^+;$$

$$Fe^{3+} + 3H_2O \Leftrightarrow Fe(OH)_3 \downarrow + 3H^+$$

С повышением pH раствора происходит более полный гидролиз. Когда концентрация OH^- и HCO_3^- в воде недостаточна для полного гидролиза коагулянтов, увеличивают щелочность воды путем введения в нее подщелачивающих реагентов: извести, соды.

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 ($Al^{3+} \leq 0{,}2$ 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; доза коагулянта

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. 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 объёме 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 pH воды и др. Контактная коагуляция осуществляется в осветителях со слоем взвешенного осадка, на контактных фильтрах и на контактных осветителях.

При гетероадагуляции 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 осветлителях) выше, чем при слипании мелких однородных частиц между собой.

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.

2.2. Реагенты, используемые в технологии улучшения качества воды

В процессах подготовки природных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения применяется большое число химических реагентов, в том числе коагулянтов, флокулянтов и подщелачивающих реагентов.

Алюминия сульфат (глинозем) $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ используется в качестве коагулянта и для обесфторивания воды. Выпускается в виде дробленых пластин, гранул или порошка. Насыпная масса 1,1-1,4 т/м^3. Характеризуется содержанием чистого вещества в расчете на оксид Al_2O_3, составляющем в зависимости от качества продукта (сорта, марки) от 9 до 19 % по массе. Водные растворы его имеют кислую реакцию (pH 1%-ного раствора около 3,4).

Алюминия оксихлорид $[Al_2(OH)_5Cl] \cdot 6H_2O$ используется в качестве коагулянта. В твердом виде - зеленоватые кристаллы с содержанием основного вещества 40-44 % по Al_2O_3. Поставляется в виде 10 и18 %-го раствора или в виде порошка. Растворы имеют кислую реакцию.

Железа сульфат (II), железный купорос $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ – светло-зеленые кристаллы, насыпная масса ~ 1,5 т/м^3; содержание $FeSO_4$ в товарном продукте 40-53 % (17-19,5 % Fe). Растворы имеют кислую реакцию, pH 10%-ного раствора ~ 2,8.

Железа сульфат (III) $Fe_2(SO_4)_3 \cdot 7H_2O$ применяется в качестве коагулянта

(часто смеси с хлоридом железа, насыпная масса 1,5 т/м^3. В растворах подвергается гидролизу с образованием серной кислоты. Растворы имеют кислую реакцию.

Железа хлорид $FeCl_3$ применяется в качестве коагулянта.В твердом виде гигроскопичен, на воздухе расплывается. Поставляется в металлических герметичных барабанах с содержанием основного вещества до 98 %. Насыпная масса 1,5 т/м^3. В жидком виде поставляется с содержанием $FeCl_3$ ~ 40%. Растворы имеют кислую реакцию.

Силикат натрия (жидкое стекло) Na_2SiO_3 применяется для приготовления активированной кремниевой кислоты в качестве флокулянта и как ингибитор коррозии; поставляется или в жидком виде. Содержание основного вещества в растворах 24-29,5 %, плотность 1,32-1,41 т/м^3, вязкость от 40 до 300 мПа·с.

Водорастворимые полиэлектролиты катионные, анионные или нейтральные используются в качестве флокулянтов: поставляются в порошкообразном, гелеобразном или жидком виде. *Полиакриламид* применяется в качестве флокулянта. Слабоанионный. Поставляется в виде 8%-го геля. Содержание ионогенных групп - 6-8 %.

Известь негашеная CaO используется для нейтрализации и декарбонизации воды после гашения в виде суспензии (известкового молока); поставляется в твердом виде навалом или в контейнерах; кажущаяся плотность от 0,8 до 1,2 г/м^3, содержит не менее 90 % CaO; обладает щелочной реакцией.

Известь гашеная $Ca(OH)_2$ используется для тех же целей, поставляется в виде порошка с кажущейся плотностью 0,4-0,6 т/м^3, в бумажных или полиэтиленовых мешках или контейнерах.

Едкий натр (каустическая сода) NaOH используется для регенерации OH-анионитовых фильтров, умягчения воды и корректировки pH; поставляется в твердом (куски, чешуйки) виде с содержанием NaOH 92-98 % и насыпной массой 1,5 т/м^3 в железных барабанах или в виде 40-42 %-ных растворов; в твердом виде гигроскопична, на воздухе расплывается; при растворении в воде выделяет большое количество тепла.

Карбонат натрия (сода кальцинированная) Na_2CO_3 применяется для регулирования щелочности и умягчения воды, для регенерации слабоосновных анионитов; поставляется в виде белого порошка с кажущейся плотностью 0,5-0,7 т/м^3; содержание основного вещества в продукте не менее 95 %.

Ориентировочная доза коагулянта определяется в зависимости от мутности и цветности обрабатываемой воды. При применении контактных осветлителей или контактных фильтров эта доза может быть уменьшена на 10-15 %. При

коагулировании воды алюминатом натрия его доза составляет 1/10-1/20 от дозы сернокислого алюминия.

Доза флокулянтов (полиакриламида) для улучшения процесса хлопьеобразования определяется по мутности, цветности и точки ввода реагента.

Таблица 3

Ориентировочная доза коагулянтов

Мутность воды, мг/л	Доза безводного коагулянта для обработки мутных вод, мг/л
До 100	25-30
От 100 до 200	30-40
От 200 до 400	35-45
От 400 до 600	45-50
От 600 до 800	50-60
От 800 до 1000	60-70
От 1000 до 1500	70-80

Таблица 4

Ориентировочная доза ПАА

Мутность воды, мг/л	Цветность воды, град	Доза безводного ПАА, мг/л
До 10	Св. 50	0,1-0,5
От 10 до 100	30-100	0,3-0,6
От 100 до 500	20-60	0,2-0,5
От 500 до 1500	–	0,2-1

Доза подщелачивающего реагента определяется по СНиП. Доза хлорсодержащих реагентов (по активному хлору) принимается: для обеззараживания воды поверхностных источников после ее очистки – до 2-3 мг/л, подземных источников – 0,7-1 мг/л. При большом содержании органических веществ в исходной воде для улучшения процессов коагуляции и обесцвечивания иногда производится предварительное ее хлорирование с дозой хлора более 3 мг/л. Дозы порошкового активного угля или перманганата калия, используемых для удаления привкусов и запахов из воды, определяются по результатам технологических исследований. В процессе эксплуатации сооружений дозы реагентов должны уточняться с учетом колебаний качества воды методом пробного коагулирования.

Последовательность ввода реагентов: первичное хлорирование, через 2-3 минуты коагулянта, через 2-3 минуты флокулянт. Известь или соду вводят одновременно с коагулянтом.

2.3. Реагентное хозяйство: хранение, приготовление и дозирование суспензий и растворов реагентов

Реагенты, применяемые для очистки воды, готовят непосредственно на водоочистном комплексе. Состав и насыщенность реагентного хозяйства зависят от принятой технологии улучшения качества воды. Помимо цехов коагулирования, хлорирования, известкования, могут быть цехи фторирования, углевания и др.

Способы хранения реагентов зависят от их вида (куски, порошки, жидкости, растворы, сжиженные газы), производительности станции водоподготовки, способа доставки, необходимого запаса, климатических условий и т.д. *Порошкообразные реагенты* хранятся на специальных складах в мешках, в контейнерах, бункерах или башнях, в условиях, предотвращающих их слеживание и воздействие атмосферных осадков. *Жидкие реагенты* для небольших станций доставляются и хранятся в бутылях с обрешеткой, бочках, контейнерах. Для больших станций они могут доставляться в авто- и железнодорожных цистернах, из которых перекачиваются, передавливаются или переливаются самотеком в резервуары хранилища, имеющие поддоны и приямки для сбора возможных проливов.

Схема приготовления коагулянта при *сухом* хранении целесообразна при расходе коагулянта до 5-6 т/сут. Транспортирование коагулянта по складу и загрузка в растворные баки осуществляют с помощью кран-балки и подвесного грейфера емкостью до 0,5 $м^3$ с помощью дистанционного пульта. Склад коагулянта находится в не отапливаемом помещении.

Расходные баки находятся в отапливаемом помещении, отделяемом от склада капитальной перегородкой. Из растворных баков раствор коагулянта концентрацией 10-15 % перепускается в расходные баки, где разбавляется до рабочей концентрации (4-10 %). Для перемешивания раствора в нижнюю часть баков через дырчатую систему труб подается воздух. Из расходных баков раствор коагулянта подается в смеситель насосом-дозатором, либо кислотостойким насосом через дозатор любого типа. Количество расходных – 3 шт, растворных баков – 2 шт. Насосов должно быть не менее двух. Для растворения и перемешивания коагулянта в баках предусматривается подвод воздуха от воздуходувок. Воздуходувки могут располагаться в одном помещении с расходными баками и насосами.

При *мокром* хранении коагулянта в растворных баках-хранилищах коагулянт доставляется автотранспортом и загружается в растворные баки-хранилища, где растворяется и хранится в виде 15-20 % концентрированного раствора. Емкость баков-хранилищ рассчитывается на 30-суточный расход реагента. Количество баков должно быть не менее трех. После растворения производится отстаивание коагулянта. Осадок собирается в нижней, подрешеточной части баков и сбрасывается в канализационный лоток. Из

верхней отстойной части баков-хранилищ крепкий раствор коагулянта забирается насосом с помощью поплавка и перекачивается в расходные баки, где готовится рабочий раствор. Количество расходных баков в этой схеме должно быть не менее двух, растворных баков и баков-хранилищ – не менее четырех.

Применение оборудования для перемешивания раствора в баках-хранилищах с помощью воздуха предусматривать не следует. На крупных станциях по экономическим соображениям резервуары обычно располагают вне здания реагентного хозяйства, но защищают от замерзания раствора. Температура замерзания 30% раствора коагулянта -5^{o}С.

Перемешивание известкового молока в гидравлических мешалках, перекачка угольной пульпы производится насосами типа ФГ, устанавливаемыми под залив без обратных клапанов. При стабилизации воды известковое молоко должно вводиться перед фильтрами, что увеличивает нагрузку на фильтры по загрязнениям и уменьшает длительность их фильтроциклов.

ПАА хранится на станциях очистки в таре и растворяется в баках с механическими мешалками с числом оборотов вала 800-1000 в 1 мин. и гидравлической циркуляцией. Производительность аппарата принимают с учетом времени полного цикла приготовления раствора из сухого или гелеобразного ПАА, равного соответственно 2 ч и 25-40 мин. Срок хранения раствора ПАА на станциях очистки воды не должен превышать 15 суток (при большом сроке хранения ПАА стареет). Водные растворы ПАА не обладают коррозийными свойствами и дозируются в воду с концентрацией 0,5-1 %. Число мешалок и объем расходных баков определяют, исходя из срока хранения запасов раствора ПАА.

Технология известкования воды зависит от назначения, места ввода, количества реагента и вида заводского продукта. Так, при суточном расходе извести до 50 кг (по СаО) разрешается схема с использованием известкового раствора, предусматривающая склад мокрого хранения, устройство для отбора теста, вертикальный отстойник или гидроциклон для осветления известкового молока, сатуратор двойного насыщения и дозатор. При большем расходе извести известковое молоко или раствор готовят в баках, число которых принимают не менее двух. Они должны иметь конические днища с наклоном не менее 450 и сбросные трубы диаметром не менее 100 мм. Концентрация известкового молока в расходных баках должна быть не более 5%, считая по СаО. Известковое молоко перемешивают циркуляционным насосом или механической мешалкой.

Содовый раствор концентрацией 5-8% делают в специальных баках. Угольную пульпу для углевания готовят в баках с гидравлическим или механическим перемешиванием путем замачивания угля в течение одного часа. Концентрацию пульпы принимают 5 - 10%, скорость ее движения в трубопроводах – не менее 1,5 м/с.

Транспортирование и растворение реагентов сопровождается значительным выделением вредных веществ в воздух. Поэтому реагентное

хозяйство обычно сблокировано в одной части здания очистки воды. Внутри цеха реагентного хозяйства должно быть деление на помещения с однородными выделениями вредных веществ.

Примерно однородными помещениями можно считать склад коагулянта и извести, в котором обычно находятся растворные баки коагулянта и известегасилки; помещение расходных баков, в которых обычно находятся также насосы и воздуходувки; помещение хранения и приготовления ПАА; фтораторная, блок углевания, хлораторная и другие помещения.

Склады реагентов, за исключением хлора и аммиака, размещают вблизи оборудования для приготовления их растворов или суспензий.

Хлор хранят в баллонах вместимостью до 30 и до 100 кг или в бочках, рассчитанных на 700-3000 кг жидкого хлора, на расходных складах, располагаемых в пониженных точках площадки водоочистных сооружений, а хлорную известь – в деревянных бочках вместимостью 100 и 275 л и полиэтиленовых мешках объемом 75 л на отдельном складе.

Реагенты дозируются в воду в виде порошков или гранул (молотая известь, порошкообразный активный уголь и др.), суспензий (известковое молоко, активные угли, хлорная известь), истинных растворов (коагулянты, щелочи, кислоты) и газов (хлор, аммиак, диоксид серы). Поэтому, в практике обработки воды применяются дозаторы для сухих реагентов, суспензий, растворов, газов.

Дозаторы сухих реагентов приспособлены для подачи их в открытые лотки или специальные смесители, где осуществляется их быстрое растворение. При этом могут использоваться тарельчатые, шнековые, вибрационные, ленточные, объемные или весовые дозаторы, а также другие питатели, применяемые в химической промышленности и промышленности строительных материалов.

Для дозирования растворов и суспензий используются насосы-дозаторы, сифонные насосы, а также гравитационные шайбовые дозаторы, дозаторы, работающие по принципу деления струи и др. Так как в технологии водоподготовки из газообразных реагентов наиболее часто применяется хлор, то в соответствующей литературе детально рассмотрены конструкции различных хлораторов. В этих конструкциях соблюдается, в основном, принцип работы хлораторов под вакуумом.

По принципу действия дозаторы для дозирования всех реагентов подразделяются на: а) дозаторы постоянного расхода; б) дозаторы подачи реагента пропорционального расходу обрабатываемой воды; в) дозаторы, рассчитанные на поддержание заданных параметров качества воды. В последнем случае дозирование реагентов производится с помощью систем автоматического регулирования и управления процессами обработки воды (АСУ, САР).

Глава 3. Смешение реагентов с водой

Основополагающим условием коагулирования примесей воды является равномерное и быстрое распределение реагентов в её объеме для обеспечения

максимального контакта частиц примесей с промежуточными продуктами гидролиза, 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.

$$G = \sqrt{\frac{N_{уд}}{\mu}} = \sqrt{\frac{E}{W \cdot t \cdot \mu}}, \text{ с}^{-1}$$

где $N_{уд}$ – 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.

$$K = G \cdot t = t\sqrt{\frac{N_{уд}}{\mu}},$$

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 так же 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.

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.

Классификация гидравлических смесителей.

а) по характеру сопротивления:

• с переменным сопротивлением (ершовый, вихревой, перегородчатый, гидравлический прыжок в быстротоке);

• 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 быстротоке;

• 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, приспосабливаемые 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. 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, сто способствует быстрому и полному смешению реагента с водой. Расстояния между перегородками должны равняться двойной ширине лотка.

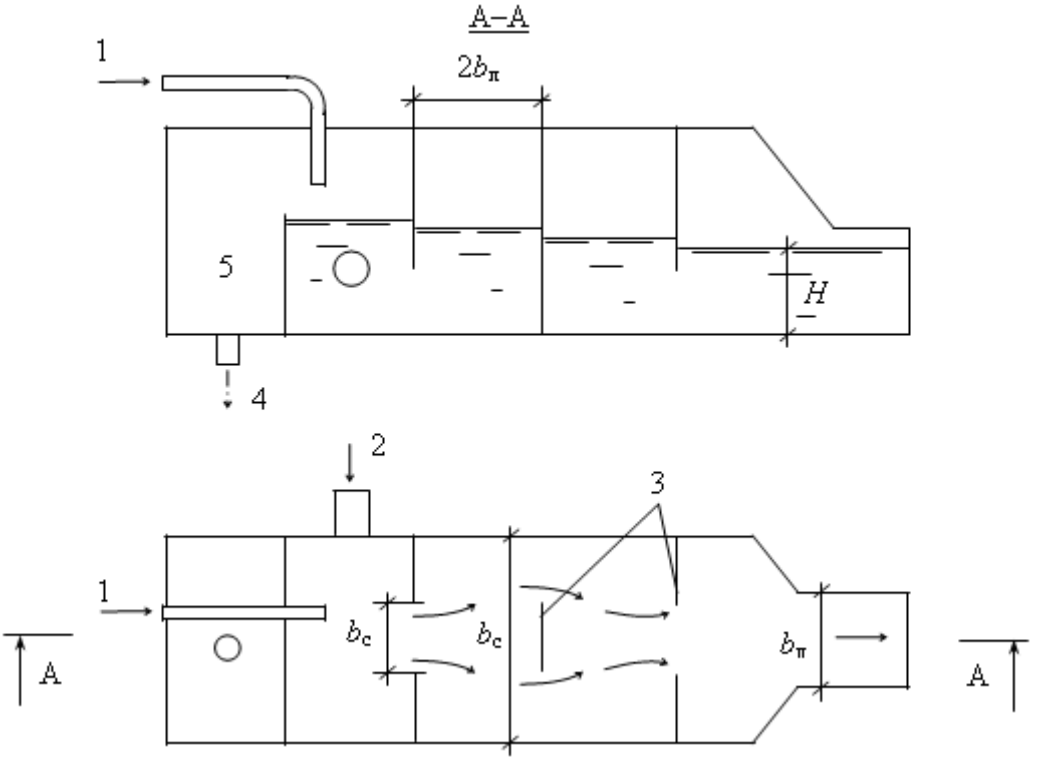

Рис. 3.1. Перегородчатый смеситель:
1 – подача коагулянта; 2 – подача исходной воды (из водоисточника);
3 – перегородки; 4 – переливная труба; 5 – переливная камера

Одним из приёмов интенсификации и улучшения процесса коагуляции является мгновенное перемешивание воды с коагулянтом **в диафрагмовом смесителе** 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.

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. 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.

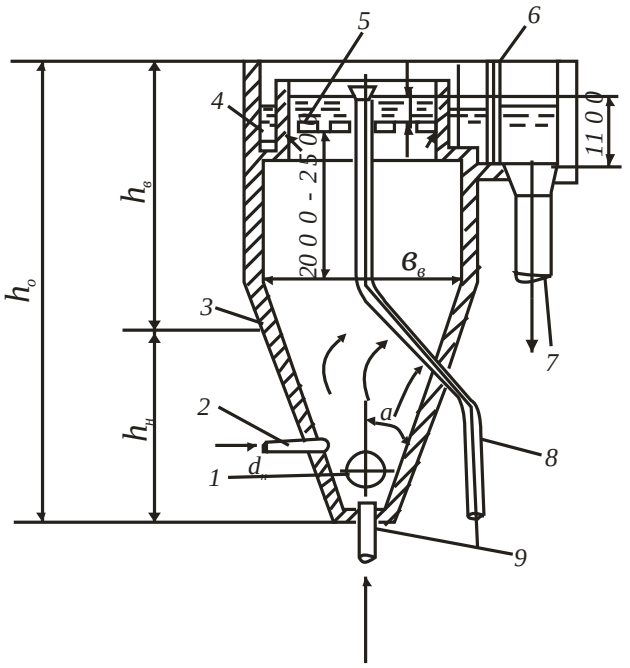

Рис. 3.2. Вертикальный смеситель:
1 – подвод воды; 2 – подвод реагентов; 3 – бетонный корпус; 4 – кольцевой желоб; 5 – затопленные отверстия; 6 – сетка; 7 – отвод воды; 8 – перелив; 9 – трубопровод для опорожнения

Дырчатый смеситель представляет собой лоток с дырчатыми перегородками, установленными перпендикулярно направлению движения воды. 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.

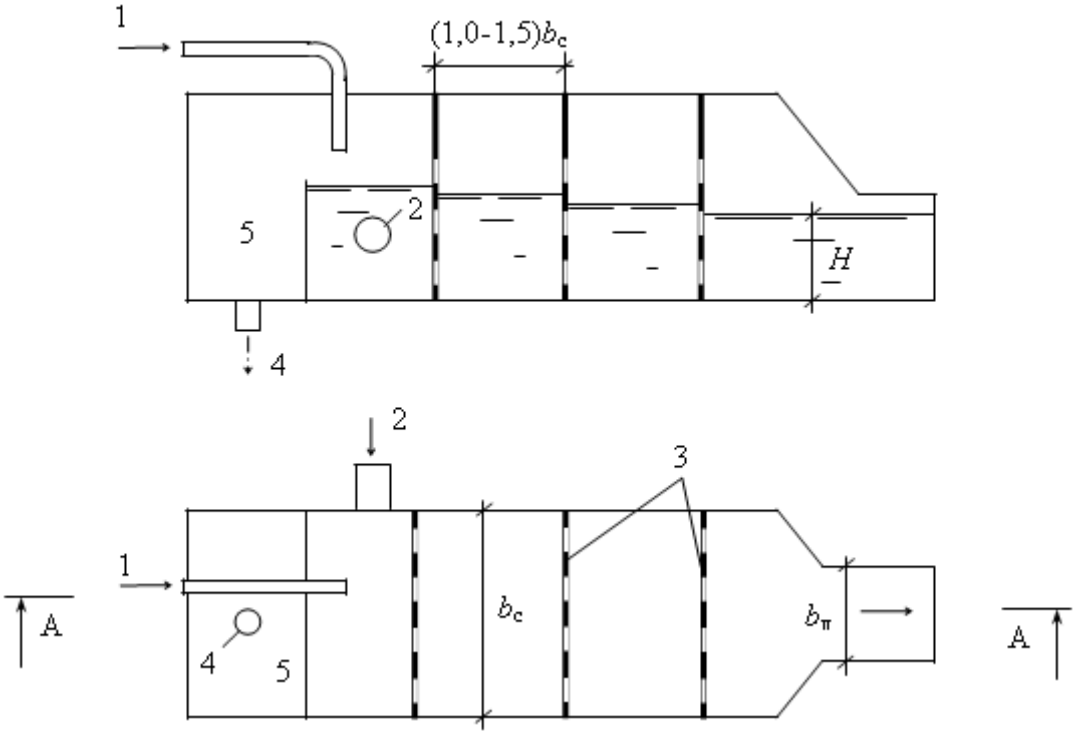

Рис. 3.3. Дырчатый смеситель:
1 – подача коагулянта; 2 – подача исходной воды; 3 – перегородки; 4 – переливная труба; 5 – переливная камера

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. 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.

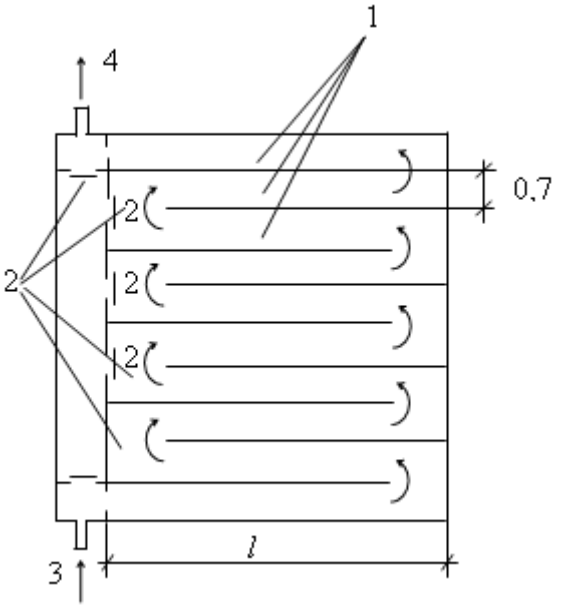

Рис. 3.4. Коридорный смеситель:
1 - коридоры; 2 - шиберы; 3 - подача исходной воды; 4 - отвод воды с реагентами

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.

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).

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, и при наиболее полном использовании реагентов увеличить плотность образующихся хлопьев.

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 $м^3$/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 $мин^{-1}$.

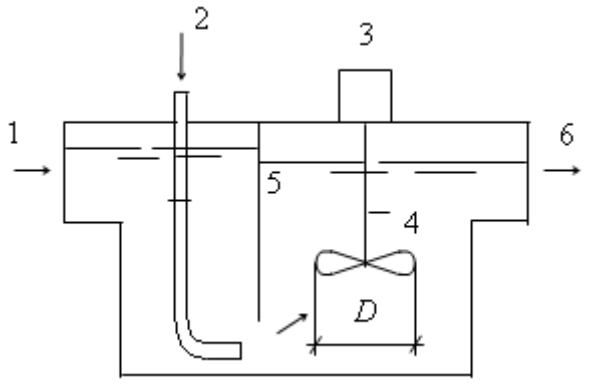

Рис. 3.5. Механический смеситель
1 – подача исходной воды; 2 – подача реагента; 3 – двигатель с приводом для мешалки; 4 – механическая мешалка; 5 – перегородка; 6 – отвод воды с реагентом

Глава 4. 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 $с^{-1}$; 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 СНиП 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 псевдоожиженной зернистой загрузкой, с циркуляцией осадка, с контактной загрузкой.

Вихревая камера хлопьеобразования 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 0,05м/с для цветных вод и 0,1 м/с - для мутных. Для интенсификации работы камеры в ее верхней части могут размещаться тонкослойные модули.

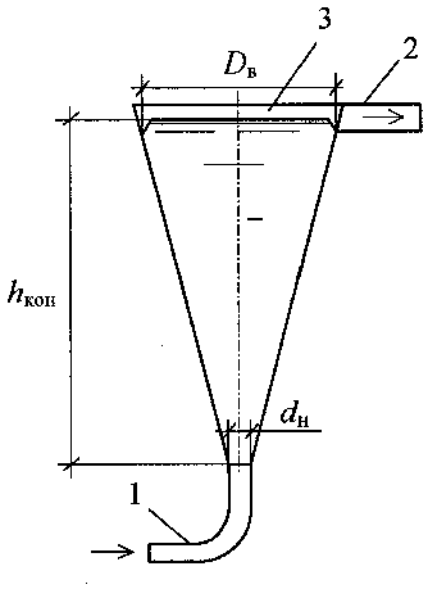

Рис. 4.1. Вихревая камера хлопьеобразования:
1 – подвод исходной воды; 2 – отвод воды после КХО; 3 – кольцевой желоб

Водоворотная камера хлопьеобразования совмещается с вертикальным отстойником и располагается в центральном стакане. 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.

Градиент скорости перемешивания в таких камерах определяют по формуле:

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

где v – скорость движения воды, м/с; ρ – плотность воды в кг/м^3; η – вязкость воды в Па·с; Q – расход воды, м^3/с; w – объем камеры, м^3.

Перегородчатая камера хлопьеобразования (примыкает к горизонтальным отстойникам) представляет собой прямоугольный железобетонный резервуар с перегородками, 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.

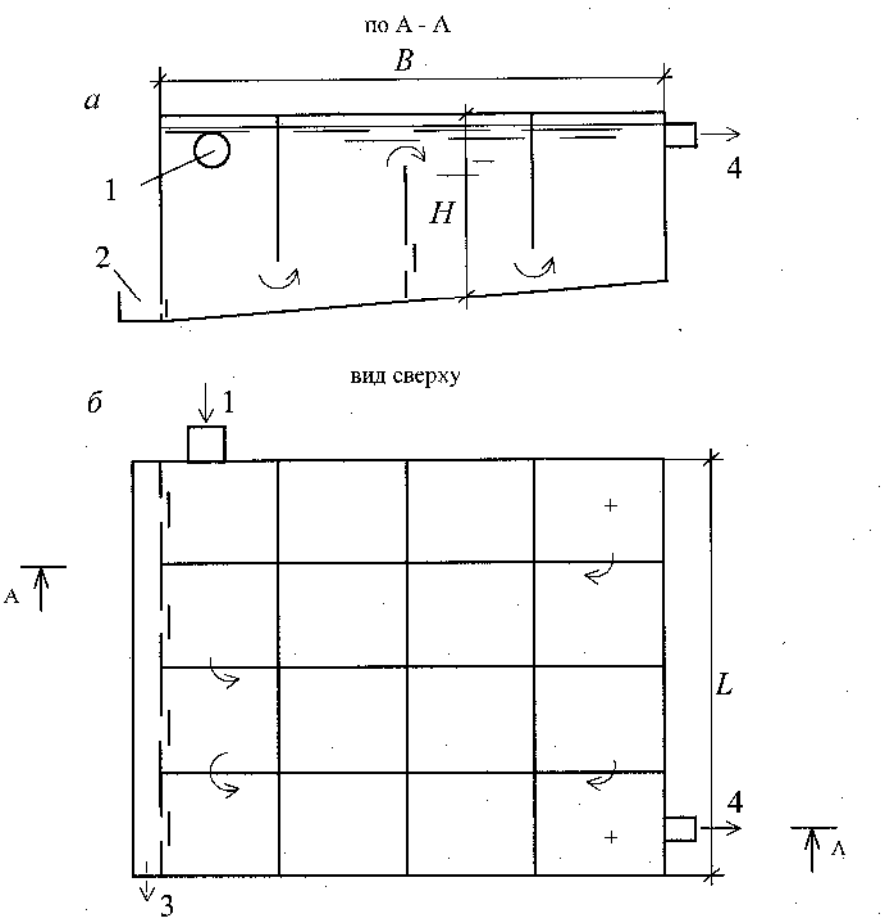

Рис. 4.2. Схема перегородчатой камеры хлопьеобразования с вертикальной циркуляцией воды:
а – разрез; б – план; 1 – подвод воды; 2 – сток; 3 – выпуск осадка; 4 – отвод воды

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:

$$G = \left[\frac{\left(n v_1^2 + (n-1) v_2^2 Q \rho \right)}{2 w \eta} \right]^{0,5}, \text{ с}^{-1}$$

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

Камера хлопьеобразования зашламленного типа с вертикальными

перегородками применяется для вод с мутностью до 1500 мг/л. 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.

При кондиционировании маломутных цветных вод хорошо зарекомендовала себя камера хлопьеобразования замшламленного типа с рециркуляцией осадка. 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.

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. 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.

Флокуляторы с мешалками на вертикальных осях обычно оборудуют двигателями с переменной частотой вращения; при размещении мешалок на горизонтальных осях один двигатель обслуживает несколько мешалок. Мешалки располагают в начале коридора отстойника в два ряда и более и разделяют перегородками для циркуляции воды. Флокуляторы имеют различную форму в плане (квадратную, круглую и прямоугольную).

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.

Градиент скорости перемешивания воды в них определяется по формуле:

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

n – число осей с лопастями.

Аэрофокуляторы – барботажные камеры хлопьеобразования получают все более широкое распространение в технологии водоподготовки благодаря дешевизне и доступности воздуха, невысокой стоимости оборудования, высокого эффекта хлопьеобразования. 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 $м^3/(м^2 \cdot мин)$, при этом расход воздуха не превышает 5% расхода обрабатываемой воды.

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 $с^{-1}$, 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.

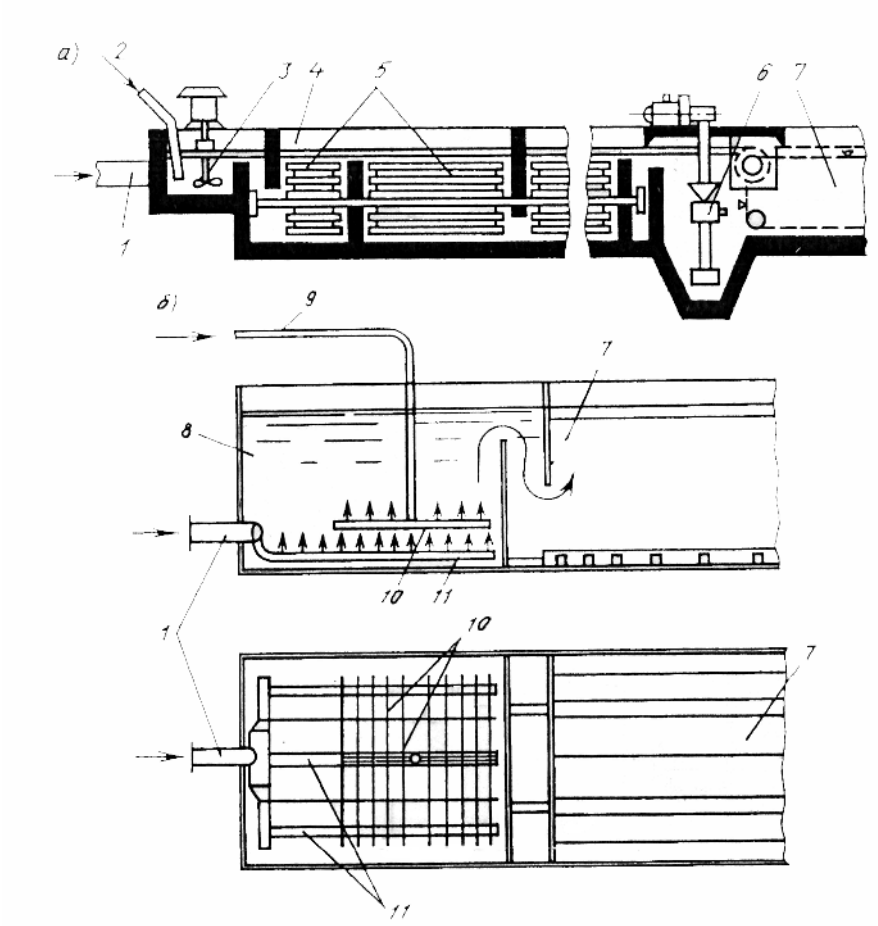

Рис. 4.3. Флокулятор (а) и аэрофлокулятор (б), совмещенные с горизонтальным отстойником:
1, 2 – подача воды и реагента; 3 – мешалка смесителя; 4 – флокулятор; 5 – мешалки на горизонтальной оси; 6 – грязевой насос; 7 – горизонтальный отстойник; 8 – камера флокулятора; 9 – подача воздуха; 10, 11 – воздухо- и водораспределительные трубчатые перфорированные системы.

Глава 5. Обработка воды на первом этапе

5.1. Предварительная обработка воды

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.

Современное представление о сопротивлении сетчатых полотен и потерь напора в сетках базируется на существовании функциональной зависимости между величиной потерь давления ΔP и параметрами, характеризующими плотность и вязкость жидкости ($\rho_ж$, μ), скоростью движения воды через сетку (v_c) и характеристиками структуры сетчатых полотен, прежде всего гидравлическим радиусом l_c и порозностью сеток m_o:

$$\Delta P = f\left(\rho_ж, \mu, v_c, l_{c,} m_o\right).$$

Для фильтрующих сеток постоянной толщины с постоянной долей отверстий в ней, то есть с постоянной начальной пористостью m_o, объем фильтрата $W_ф$, получаемый за время t с единицы поверхности (площади) сетки F, прямо пропорционален разности давлений на входе и выходе сетки ($\Delta P = P_1 - P_2$) и обратно пропорционален вязкости фильтрата μ и сопротивлению осадка, образуемого на сетке в процессе фильтрования $R_{ос}$, и фильтровальной сетки $R_с$:

$$\frac{dW_ф}{Fdt} = \frac{\Delta P}{\mu \cdot \left(r_o \cdot X_o \cdot \frac{W_ф}{F} + R_c \right)},$$

где r_o – сопротивление, оказываемое потоку фильтрата равномерным слоем осадка толщиной 1 мм.

В процессе фильтрования суспензий через сетчатое полотно слой осадка на сетке будет возрастать, что приведет к повышению его сопротивления. При постоянном давлении жидкости на входе (P = const) в процессе фильтроцикла скорость фильтрования будет уменьшаться.

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 ΔP_{max} к концу фильтроцикла: $\Delta P_{max} \leq$ 0,1-0,2 м

Тогда при принятой скорости фильтрования v продолжительность полезного фильтрования между промывками сетки $t_ф$ определяется по формуле:

$$t_ф = \frac{{}_\Delta P_{max} - \mu \cdot R_c \cdot v}{\mu \cdot r_o \cdot X_o \cdot \left({}_\Delta P_{oc}\right)^a \cdot v^2}, \text{ ч.}$$

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. Микрофильтры и барабанные сетки серийно выпускаются Воронежским заводом «Водмашоборудование».

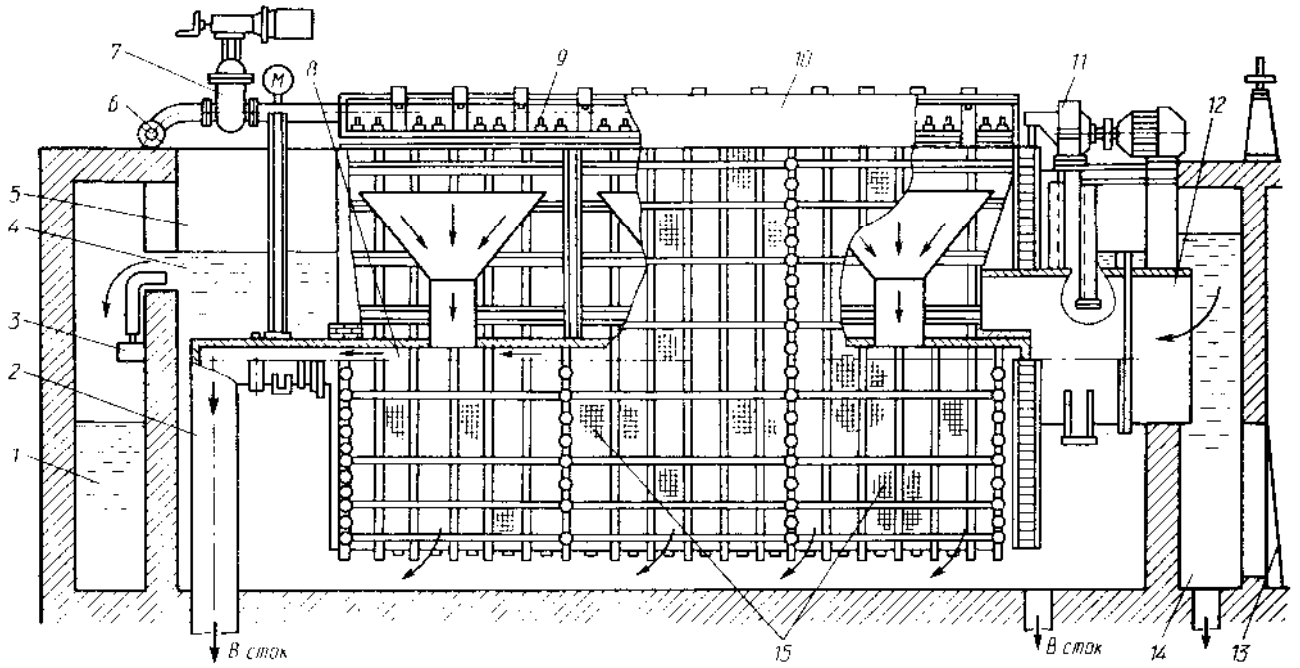

Рис. 5.1. Микрофильтр (барабанная сетка):
1 – сборный канал; 2 – трубопровод отвода промывной воды; 3 – датчик уровня; 4 – водосливное окно; 5 – камера; 6 – трубопровод подачи промывной воды; 7 – задвижка с электроприводом; 8 – центральная труба с воронками сбора промывной воды; 9 – пластинчатые разбрызгиватели; 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

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.

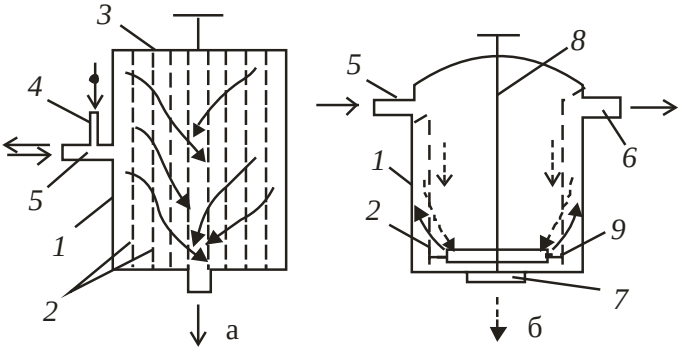

Рис. 5.2. Вертикальные сетчатые фильтры американских фирм «Drip-Eze» (а) и «Bermad» (б):
→ – направление движения фильтруемой воды; - - - → – направление движения промывной

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

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%.

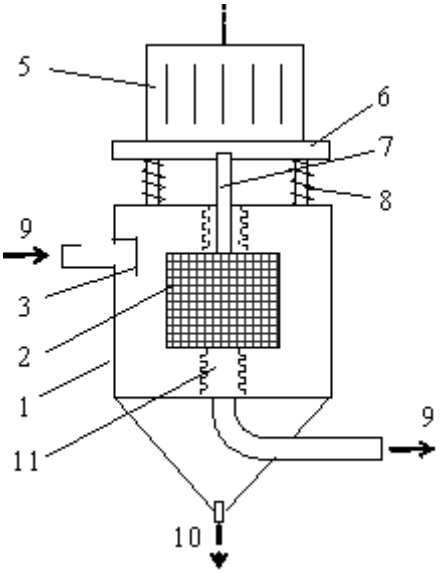

Рис. 5.3. Схема акустического фильтра:
1 - металлический корпус; 2 - фильтрующий элемент; 3 – водоотбойная пластина; 4 – подвод исходной воды; 5 – электромагнитный вибратор; 6 – опорная плита; 7 – шток; 8 – пружина; 9 – отвод осветленной воды; 10 – система оттарированных насадок; 11 – сильфонные уплотнения

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.

5.2. Удаление взвешенных веществ осаждением, теоретические основы процесса

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:

$$F_3 = \varphi_3 \cdot \rho_1 \cdot \Theta^2 \cdot d_r ,$$

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

$$Re = \rho_1 \cdot \Theta \cdot d \Big/ \eta ,$$

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: $F_3 = G_r$,

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

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

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

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

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

$$\Theta = \frac{d^2}{18} \cdot \frac{\rho_2 - \rho_1}{\eta} g .$$

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

$$\Theta = \frac{\pi d^3}{6\varphi^3} \cdot g \cdot \left(\frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1} \right)^{0,5}$$

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.

$$\frac{t_н}{t_м} = \frac{h_н}{h_м},$$

где $t_н$, $h_н$ – параметры натуры; $t_м$, $h_м$ – параметры модели отстойника.

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

$$\frac{t_н}{t_м} = \left(\frac{h_н}{h_м} \right)^n,$$

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 час, второй – 6 часов. Соотношение этих

величин U_1/U_2 принято называть показателем осаждаемости взвеси. При заданном эффекте осветления воды осаждением по концентрации взвеси в воде до (C_o мг/л) и после (С, мг/л) отстойника:

$$Э = \frac{C_o - C}{C_o},$$

расчетные значения процентной скорости осаждения взвеси находят по формуле:

$$U_p = \frac{1{,}2B - 0{,}2A - Э}{B - A}.$$

Это значение может быть использовано для расчета отстойников при условии соблюдения рассмотренного выше равенства.

5.3. 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 Н ≥ 2,0 м, и малой глубиной зоны осаждения (Н ≤ 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.

Скорость выпадения частиц u при t = 10 ^oC 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 $м^3$/сут. Для повышения эффективности осветления горизонтальные отстойники оборудуются тонкослойными модулями.

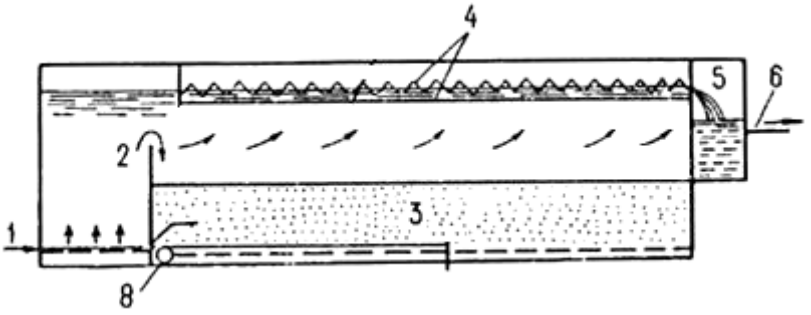

Рис. 5.4. Горизонтальный отстойник, оборудованный тонкослойными блоками
1 – подача исходной воды; 2 – камера хлопьеобразования; 3 – зона накопления осадка; 4 -- сборные желоба; 5 – карман сбора осветленной воды; 6 – отвод осветленной воды; 7 – зона распределения воды; 8 – удаление осадка

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 работ 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 2/3 длины отстойника, считая от задней торцовой 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.

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:

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

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

$$L = H_{ср} \cdot v_{ср} / U_o, \text{ м},$$

где $H_{ср}$ – средняя высота осаждения, принимаемая равной 3÷3,5 м в зависимости от высотной схемы станции; $v_{ср}$ – расчетная скорость горизонтального движения воды в начале отстойника, принимаемая равной 6÷8, 7÷10 и 9÷12 мм/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:

$$C_{ср} = M + k \cdot D_k + 0{,}25 \cdot Ц + B_И, \text{ мг/л},$$

Объем зоны накопления и уплотнения осадка определяется по формуле:

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

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 70-80^0. Сбор осветленной воды предусматривается периферийным и радиальными желобами с затопленными отверстиями или с треугольными водосливами.

Осветление воды происходит при восходящем ее движение 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 м^3/сут.

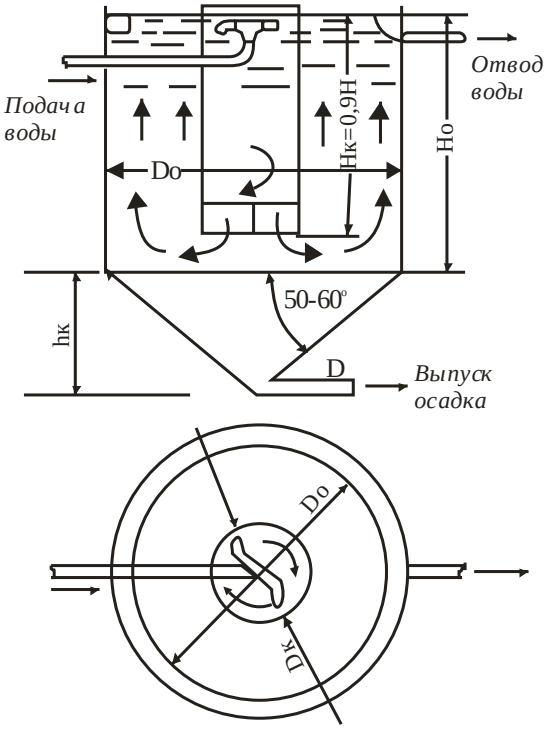

Рис. 5.5. Схема вертикального отстойника

Площадь зоны осаждения вертикального отстойника определяется по формуле:

$$F = \frac{\beta_{об} \cdot q}{3{,}6 \cdot v_p \cdot N_p}, \text{ м}^2,$$

где q – расчетный расход воды, м^3/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÷1,5 (нижний предел – при отношении диаметра к высоте отстойника равном 1, верхний – при отношении равном 1,5).

При количестве отстойников менее 6 следует предусматривать 1 резервный.

Площадь камеры хлопьеобразования находится по формуле:

$$f_к = \frac{q \cdot t}{60 \cdot H_k \cdot N}, \text{ м}^2,$$

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.

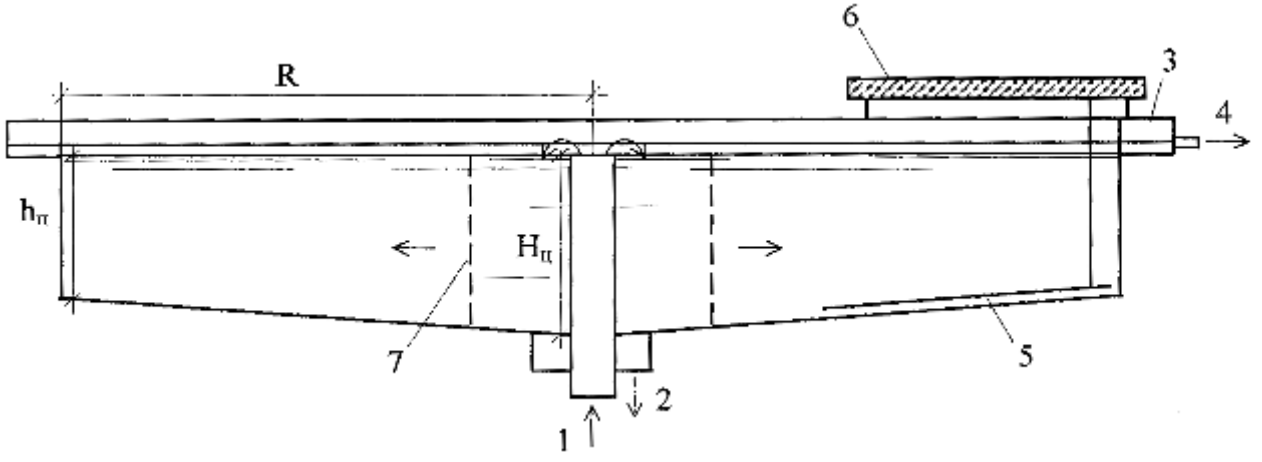

Рис. 5.6. Радиальный отстойник:

1 – центральная подающая труба; 2 – приямок 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 ($С_{вх}$) и после ($С_{вых}$) отстойника:

$$Э = \frac{C_{вх} - C_{вых}}{C_{вх}} \cdot 100\,\%.$$

Затем определяют требуемую их площадь по формуле:

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

где q – расчетный расход воды, м^3/ч; U_o – скорость выпадения взвеси, принимаемая 0,5÷0,6 мм/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 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.

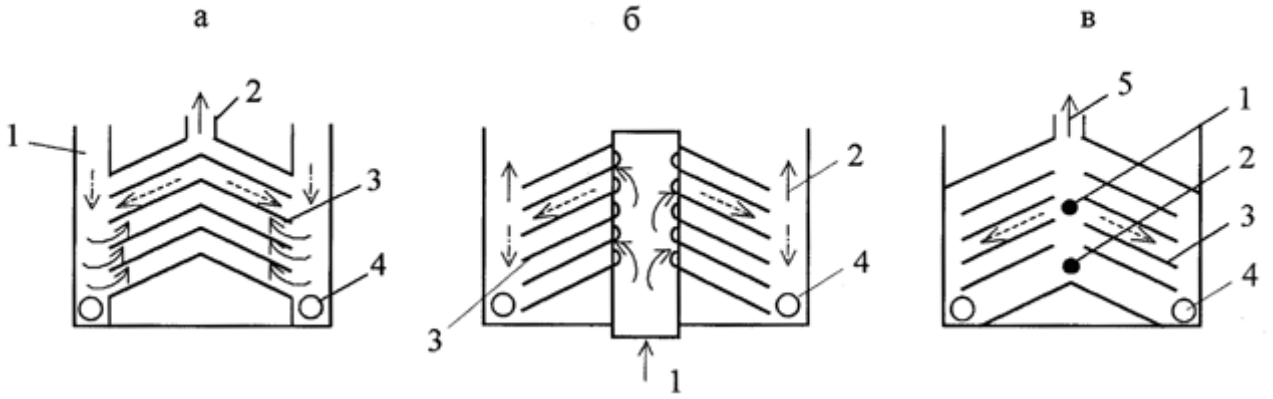

Рис. 5.7. Схемы тонкослойных отстойников:
а – противоточная, б – прямоточная, в – перекрестная;
1 – подача исходной воды; 2 – отвод осветленной воды; 3 – тонкослойные модули, 4 – трубопровод удаления осадка, 5 – отвод нефтепродуктов и взвеси с ρ < 1 т/м^3

Теоретическое обоснование процесса отстаивания воды в тонком слое

базируется на гидравлических условиях устойчивости потока, описываемых критерием Фруда ($Fr_{кр}$):

$$Fr_{кр} = \frac{v_м^2}{g \cdot R},$$

где $v_м$ – 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 $м^3/ч \cdot м^2$, 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°. Из конструктивных соображений по монтажу и изготовлению блоков, состоящих из множества элементов, их размеры в плане принимают не более 1,5х1,5 м.

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

5.4. 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 коагулянтом или флокулянтом. 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.

Схема работы осветлителей со слоем взвешенного осадка показана на примере коридорного осветлителя на рис. 5.9. 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 в водосток. 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 (С) за промежуток времени (t) может быть выражено дифференциальным уравнением:

$$\frac{dc}{dt} = -\beta C_o C^*,$$

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

$$\frac{C_{ex}}{C_o} = e^{-\beta \frac{c^*}{v} x}.$$

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

$$\frac{C_1}{C_o} = \delta_1 e^{-\beta_1 x'} + \delta_2 e^{-\beta_2 x'} + ... + \delta_n e^{-\beta_n x'},$$

где δ_1, δ_2, … δ_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 заключается в следующем.

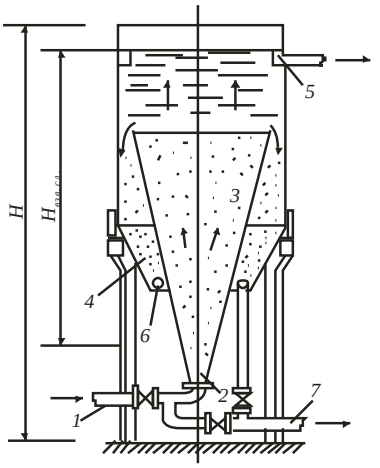

Рис. 5.8. Осветлитель со взвешенным осадком конструкции Е.Н. Тетеркина: 1 – трубопровод; 2 – диффузор; 3 – слой взвешенного осадка; 4 – осадкоуплотнитель; 5 – сборный желоб; 6 – дырчатая труба; 7 – трубопровод отвода осадка

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.

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 осветления, 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.

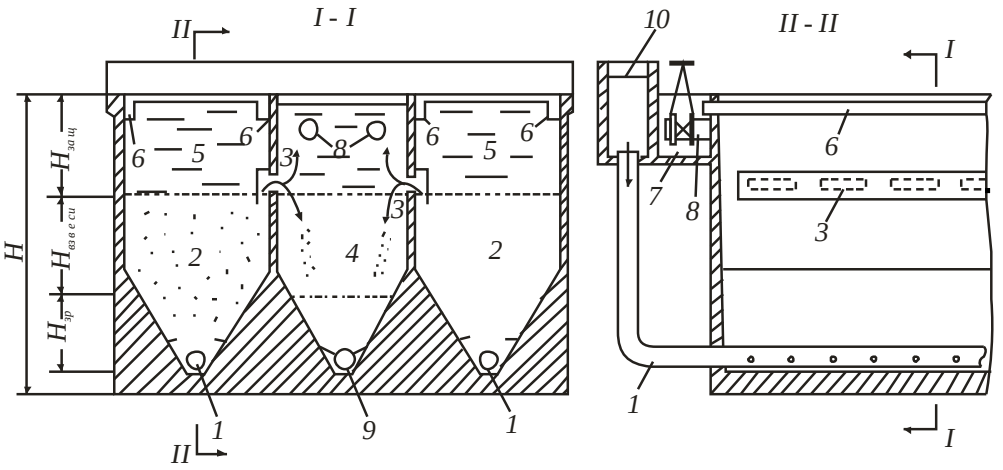

Рис. 5.9. Осветлитель коридорного типа:
1 – труба подачи исходной воды; 2 – коридоры-осветлители; 3 – окна для отвода осадка; 4 – осадкоуплотнитель; 5 – зона осветления; 6 – сборные желоба для отвода осветленной воды; 7 – канал осветленной воды; 8 – дырчатые труды для сбора осветленной воды; 9 – дырчатые трубы отвода осадка; 10 – канал подачи исходной воды

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.

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 (≥ 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, приведены в [учебник, табл. 26.1].

Общую площадь осветлителя определяют по формуле:

$$F = F_{осв} + F_{отд}, \text{м}^2,$$

где $F_{осв}$ – площадь зоны осветления, м^2; $F_{отд}$ – площадь зоны отделения осадка, м^2. Площадь одного осветлителя коридорного типа в плане не должна превышать 100-150 м^2. В зависимости от этого принимается расчетное количество осветлителей.

$$F_{осв} = \frac{qK_{р.в}}{3{,}6v_{осв}}, м^2;\ F_{отд} = \frac{q(1-K_{р.в})}{3{,}6v_{осв}},$$

где $K_{р.в}$ – коэффициент распределения воды между зонами осветления и отделения осадка, принимаемый по [учебник, табл. 26.2]. Ширину коридоров $B_к$ принимают в соответствии с шагом балок длины: 3 и 6 м.

Объем зоны накопления осадка определяется по формуле:

$$W_{з.у} = \frac{q \cdot T \cdot (C_o - M_{осв})}{N \cdot \delta_{ср}}, \text{м}^3,$$

где q – часовой расход воды, м^3/ч; T – время уплотнения осадка, час (принимается в пределах 2-6 ч); $C_в$ – 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, принимаемая по [учебник, табл. 26.3].

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:

$$P = \frac{K_p \cdot W_{з.у}}{24 \cdot q \cdot T} \cdot 100, \%,$$

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 осветлителе 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:

$$q_{ос} = \frac{(1-K) \cdot q}{2 \cdot N}, \text{ м}^3/\text{ч}$$

где K = 0,6-0,8 – коэффициент распределения воды между зоной осветления и осадкоуплотнителем, N – число окон.

Полная высота осветлителя определяется по формуле:

$$H_{осв} = h_{пир} + h_{верт} + h_{доп}, м,$$

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.

5.5. Удаление грубодисперсных примесей в поле центробежных сил

Для осветления воды, содержащей грубодисперсные примеси, все более широкое применение получают центрифуги и гидроциклоны. 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.

Гидроциклоны и гидроциклонные установки рекомендуется применять для предварительной очистки хозяйственно-питьевой воды; технической воды, подаваемой на охлаждение опор (подшипников) крупных насосных агрегатов; для мойки мелиоративной, дорожной и сельскохозяйственной техники; поливной воды систем капельного и мелкодисперсного дождевания при работе различного вида форсунок, требующих высокой степени очистки воды. Небольшие габариты, высокая удельная производительность таких аппаратов позволяет компактно и рационально объединять и размещать их в надфильтровом и подфильтровом пространстве фильтров, в отстойниках, осветлителях разных конструкций, в приемных отделениях береговых водосборных колодцев. В гидроциклонах обеспечивается извлечение минеральных примесей размером более 0,1-0,15 мм плотностью не менее 1,2 г/см^3. Гидроциклонный способ водоочистки позволяет все операции (стратификацию двухфазного потока, сгущение пульпы, вынос осадка и подачу осветленной воды) объединить в единый моногидроблок или в схему «замкнутая гидролиния».

Гидроциклонные установки классифицируются:

• по режиму движения жидкости (напорные и открытые);

• по конструктивным особенностям (конические, цилиндрические, винтовые, батарейные);

• по количеству продуктов двухпродуктовые, трехпродуктовые, батарейные (мультициклоны);

• по назначению: напорные гидроциклоны, вакуумные и напорно-вакуумные гидроциклоны, гидроциклонно-фильтрационные установки.

При подготовке поверхностных вод для технических целей и предподготовки перед глубокой очисткой используются:

блочные конструкции гидроциклонов диаметром 40, 50, 75, 80 мм, разработанные Дзержинским филиалом НИИХИММАШ, включающие от 4 до 12 аппаратов производительностью от 20 до 150 $м^3$/ч, изготовленные из нержавеющей стали или пластмасс с давлением питания до 0,6 МПа;

мультигидроциклоны, разработанные Центральным котлотурбинным институтом, включающие 52 единичных аппарата диаметром 30 мм с производительностью 50 $м^3$/ч при давлении питания 3,0 $кгс/см^2$, изготовленные из стали 3;

напорные конструкции гидроциклонов диаметром 75 и 150 мм из полиуретана, разработанные институтом «Механобр»;

гидроциклоны проблемной лаборатории НГСУ, разработанные совместно с Дзержинским филиалом НИИХИММАШ, диаметром 25, 40, 60, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 320, 400, 500 мм, изготовляемые из нержавеющей стали или пластмасс (диаметр аппаратов до 100 мм), и сборные конструкции диаметром более 100 мм – корпус аппарата из нержавеющей стали, рабочая камера монтируется из съемных стальных и пластмассовых элементов.

гидроциклоны фирмы «Laval» производительностью одного гидроциклона от 0,68 до 17 $м^3$/ч.

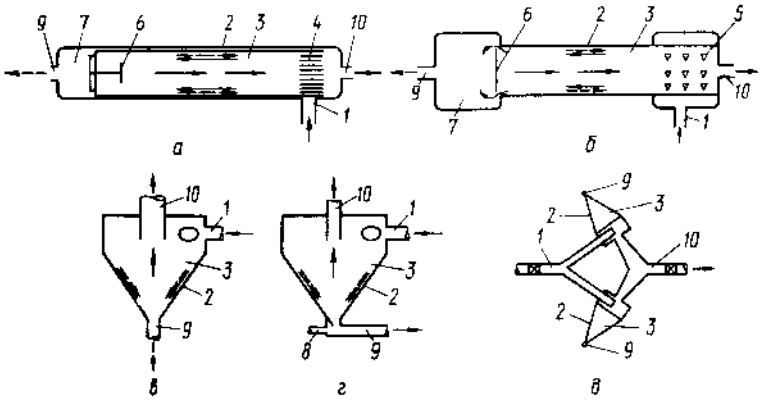

Рис. 5.10. Гидроциклоны для очистки оросительной воды в системах микроорошения: → – движение осветляемой воды; – –> - движение шлама; а – фирмы «Laval» со струенаправляющими лопатками; б – фирмы «Laval» со струенаправляющими отверстиями; в – низкого давления; г – с эжектором для принудительного отвода шлама; д – двухкамерный: 1 – патрубок подачи воды на очистку; 2 – корпус гидроциклона; 3 – циклонная камера; 4 – струенаправляющие лопатки; 5 – струенаправляющие отверстия; 6 – разделительная пластина: 7 – шламовая камера; 8 – эжектор; 9 – патрубок отвода шлама; 10 – патрубок отвода 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

$$P = \frac{\pi d^2 (\rho_T - \rho_ж) v^2}{6R}.$$

При больших значениях v 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.

Крупность граничного зерна δ, задерживаемого в гидроциклоне напорного типа для $D_ц$ = 150...450 мм, $v_φ$ = 0,8 $v_{вх}$, может быть найдена в первом приближении по формуле:

$$\delta = \sqrt{\frac{5 \cdot \mu_1 \cdot R_ц}{v_{вх} \cdot (\rho_T - \rho_ж)}},$$

где μ_1 – динамическая вязкость жидкости; $R_ц$ – радиус цилиндрической части камеры циклона; $v_{вх}$ – скорость входа воды в циклон, ρ_T и $\rho_ж$ – соответственно плотности твердой частицы и воды.

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.

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.

К достоинствам гидроциклонов следует отнести: компактность, простоту устройства и отсутствие движущихся частей; высокую объемную производительность; большую скорость и разнообразного использования, особенно в условиях действующих предприятий, 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.

5.7. Обработка воды флотацией

Флотация – метод отделения диспергированных и коллоидных примесей от воды, основанный на способности частиц прилипать к воздушным (газовым) пузырькам и переходить вместе с ними в пенный слой.

Сущность этого процесса заключается в специфическом действии молекулярных сил, вызывающих слипание частиц примесей с пузырьками высокодиспергированного в воде газа (воздуха) и образованию на поверхности пенного слоя, содержащего извлеченные вещества. При сближении в воде газового пузырька с гидрофобной поверхностью частицы примеси разделяющий их тонкий слой становится неустойчивым и разрывается. Вследствие кратковременности контакта частицы и пузырька при их столкновении вероятность слияния определяется кинетикой образования краевого угла смачивания.

Очевидно, что для успеха протекания процесса масса флотируемых частиц не должна превышать силы их прилипания к газовым пузырькам и их подъемной силы. Оптимальная крупность извлекаемых примесей находится в пределах 10^{-5} – 10^{-3} м, дисперсность пузырьков газа – $15 \cdot 10^{-6}$ – $30 \cdot 10^{-6}$ м, а поверхностное напряжение воды не должно превышать 0,06-0,065 Н/м.

С понижением поверхностного натяжения эффект очистки воды флотацией повышается в отличие от отстаивания и фильтрования. Интенсификация процесса флотации достигается гидрофобизацией поверхности извлекаемых примесей реагентами, которые, избирательно сорбируясь на поверхности частиц, понижают их смачиваемость, что улучшает процесс слипания дисперсий и коллоидов с пузырьками газа. В водоподготовке в качестве гидрофобизирующих реагентов применяют обычные коагулянты и флокулянты. После флотационной обработки осадок отработанных гидроксидов занимает значительно меньший объем и влажность его ниже, чем осадка, образующегося в отстойниках.

Известно много способов насыщения воды пузырьками газа (воздуха), среди которых по размерам диспергирования газа следует указать следующие: флотация с выделением воздуха из воды – напорные, эрлифтные и вакуумные установки; флотация с механическим введением воздуха — безнапорные (пенные), импеллерные и пневматические аппараты; фротация с подачей воздуха через пористые материалы; электрофлотация.

В пневматических установках насыщение воды воздухом осуществляют воздухом, выделяющимся из нее в результате понижения давления, в механических – турбиной насосного типа. Пневматические установки могут быть напорными и вакуумными.

Обработку воды флотацией рекомендуется применять при ее мутности до 150 мг/л и цветности до 200 град. Это позволяет уменьшить объем водоочистных сооружений вследствие ускорения в 3...5 раз, процесса выделения взвеси из воды, отказаться от микрофильтров, улучшить санитарное состояние очистных сооружений.

В последние годы в России и за рубежом для очистки поверхностных вод умеренной мутности с большим содержанием органических соединений или планктона применяют напорную флотацию, при которой выделение взвеси из воды производится с помощью пузырьков газа, получаемых из перенасыщенного водовоздушного раствора. Принцип этого метода заключается в том, что 8... 10% исходной воды, в которой под давлением 0,6…0,8 МПа растворен воздух, распределяют в обрабатываемой воде, попадая в зону меньшего давления из насыщенной воздухом воды выделяются мельчайшие его пузырьки, необходимые для флотации легкой взвеси. Способ напорной флотации позволяет путем регулирования давления легко изменять количество растворенного воздуха и размер пузырьков, вводимых в обрабатываемую воду, в зависимости от состава взвеси в исходной воде. Флотация – это процесс, основанный на слиянии отдельных частиц примесей под действием молекулярных сил с пузырьками тонкодиспергированного в воде воздуха, всплывании образующихся при этом агрегатов и образовании на поверхности флотатора пены. Флотируемость частиц различной крупности зависит от размеров пузырьков воздуха, которые определяются поверхностным натяжением на границе вода - воздух.

С понижением поверхностного натяжения эффективность очистки воды флотацией повышается в отличие от отстаивания и фильтрования. При предварительном коагулировании примесей воды эффект флотации повышается.

При напорной флотации время пребывания воды в напорном контактном резервуаре принимают до 2 мин, объем вводимого воздуха 0,9...1,2%, от объема обрабатываемой воды. Объем флотатора рассчитывают на 20...60-е минутное пребывание воды, удельную нагрузку принимают 6...8 $м^3/(м^2 \cdot ч)$. При пневматическом диспергировании принимают до 7,0 $м^3/(м^2 \cdot ч)$.

Вид содержащихся в воде загрязнений определяет характер флотационной обработки: одним воздухом или воздухом в сочетании с различными реагентами и прежде всего коагулянтами. Использование коагулянтов позволяет

значительно повысить эффективность флотационной очистки и удалять загрязнения, находящиеся в воде в виде стойких эмульсий и взвесей, а также в коллоидном состоянии. В практике применяют две схемы флотационной очистки. В первом случае для насыщения воздухом используют исходную неочищенную воду, а во втором – воду, прошедшую очистку. В отечественной практике рекомендуется второй вариант.

Недостатком первой схемы является то, что при использовании для насыщения воздухом неочищенной воды возможно засорение крупными примесями аппаратуры и распределительной системы. Во втором случае возможность засорения аппаратуры уменьшается, но необходимо увеличивать объем флотационной камеры на величину расхода воды, необходимого для приготовления водовоздушного раствора. Вторая схема, несмотря на некоторое удорожание, является более надежной.

При флотации в жидкости происходит ряд процессов: растворение и выделение воздуха, прикрепление воздушных пузырьков к частицам взвеси и всплывание их на поверхность с образованием пены. Условия протекания этих процессов оказывают существенное влияние на эффект обработки воды. Важное значение имеют также условия и способы удаления пены. Поэтому интересно будет рассмотреть принцип действия и конструктивные особенности всех основных элементов схемы: узла подготовки водовоздушного раствора, устройств для выделения воздуха из водовоздушного раствора, флотационной камеры и устройств для сбора и отведения пены.

Закономерности растворение воздуха в воде и аппаратура для подготовки водовоздушной смеси. Воздух представляет собой смесь газов. Растворимость газов в воде подчиняется закону Генри, из которого следует, что при постоянной температуре растворимость каждого из компонентов газовой смеси в данной жидкости прямо пропорциональна его парциальному давлению над жидкостью и не зависит от общего давления газовой смеси и общего содержания других компонентов. Количество воздуха, которое может быть растворено в воде, зависит от давления, температуры, времени насыщения и способа их взаимодействия. Эта зависимость выражается уравнением

$$q = p \cdot B \cdot (1 - \exp(-k \cdot T)),$$

где q – количество воздуха, растворенного в воде, мг/л; p – давление насыщения, Па; B – растворимость воздуха в воде, мг/л; k – константа скорости растворения, 1/мин; T – время насыщения, мин.

Давление оказывает влияние не только на количество воздуха, которое может быть растворено в воде, но и на размер выделяющихся затем пузырьков. По данным исследователей, это давление колеблется в широких пределах от $3 \cdot 10^5$ до $9 \cdot 10^5$ Па адекватно характеристике выделяемой взвеси.

В химической технологии для растворения газов в жидкостях широко используют емкостные аппараты, размеры которых зависят от продолжительности их контакта. Время контакта, в свою очередь, связано со

значением константы скорости растворения k. Так, при простом барботаже воды воздухом величина k = 0,35 1/мин и время, необходимое для полного растворения, Т = 8...10 мин. При введении воздуха с помощью эжектора k = 0,8...1,0 1/мин и время сокращается до Т = 3...4 мин. Существуют аппараты, в которых k = 1,5... 1,8 1/мин.

В условиях очистки природных вод (работа под давлением, наличие труднорастворимой смеси газов, большая производительность и др.) наиболее целесообразно применение насадочных абсорберов. Насадка подвешивается или опирается на решетку, в которой имеются отверстия для прохода газа и стока жидкости. Газ поступает в колонну снизу вверх противотоком по отношению к жидкости. Подаваемая на насадку жидкость равномерно распределяется по сечению аппарата с помощью распределительного устройства. Соприкосновение газа с жидкостью происходит в основном на смоченной поверхности насадки, по которой стекает орошающая жидкость. В качестве насадки применяют листовые, хордовые из досок, кольцевые керамические и кусковые материалы.

В напорных абсорберах применяют высокие давления, поэтому подачу воздуха в них осуществляют компрессорами.

Следовательно, при подготовке водовоздушного раствора для флотационных установок очистки природных вод перспективным является применение абсорберов с насадкой и подачей воздуха в них компрессорами.

Условия введения и распределения водовоздушного раствора в обрабатываемой воде. Растворенный воздух выделяется из воды при понижении давления, что и используется в установках напорной флотации. Минимальный размер пузырьков воздуха, образующихся при понижении давления:

$$R_{min} = 2\sigma_{гж} / (p_1 - p_2),$$

где R_{min} – минимальный радиус пузырьков воздуха, см; $\sigma_{гж}$ – поверхностное натяжение на границе раздела газ - жидкость, Н·м; $(p_1 - p_2)$ – перепад давления, Па.

Из формулы следует, что размер образующихся пузырьков тем меньше, чем меньше поверхностное натяжение на границе воздух - вода и чем больше пересыщение воды воздухом или больше перепад давления при выпуске водовоздушного раствора в обрабатываемую воду. Поверхностное натяжение зависит от свойств очищаемой воды и наличия в ней поверхностно-активных веществ. Учитывая это, можно было бы предусмотреть введение дополнительных реагентов, уменьшающих поверхностное натяжение, однако это крайне нежелательно. Более приемлемым является получение мелких пузырьков воздуха путем увеличения перепада давления, т. е. путем насыщения воды воздухом под повышенным давлением и последующим его резким понижением до атмосферного.

На практике для расчета флотационных установок используют две величины: удельную нагрузку на 1 $м^2$ площади и время пребывания воды во

флотационной камере. Эти величины определяют предварительными технологическими исследованиями. Наряду с этим за расчетный параметр можно принимать величину скорости выделения загрязнений из воды, определяемую экспериментально, например, по методике, предложенной Л. И. Шмидтом, согласно которой флотационное осветление воды проводят в статических условиях во флотационной колонне из оргстекла. Колонну заполняют исходной водой и вводят порцию мелких пузырьков воздуха. Через некоторое время после начала флотационного процесса в нижней части колонны видна четкая граница между осветленной и исходной водой, которая перемещается вверх. Скорость перемещения границы замеряется в нескольких сечениях по высоте колонны и определяется ее средняя величина, по которой производят расчет флотационной камеры. Для различных вод величина скорости подъема загрязнений варьируется в пределах 2...12 мм/с.

Флотацией можно извлекать из воды нефтепродукты, масла и другие эмульгированные жидкие вещества, радиоактивные соединения, ионы многих растворенных в воде веществ.

5.8. Конструкция флотаторов и их расчет

В состав флотационных установок входят флотационные камеры, совмещенные с камерами хлопьеобразования, узлы подготовки и распределения водовоздушного раствора, устройства для удаления и отвода пены. Флотационные камеры-флотаторы могут быть разнообразных форм (круглые или прямоугольные в плане) и конструкций (с горизонтальным и радиальным направлением движения воды).

Наиболее широко используют флотаторы с горизонтальным движением воды. Они могут иметь в плане квадратную и прямоугольную формы. Длина камеры назначается в пределах 3...9 м, ширина до 6 м, отношение ширины к длине – в пределах 2/3...1/3. Глубина слоя воды во флотаторе должна быть 1,5 ...2,5 м. Прямоугольные флотаторы чаще всего бывают вытянуты в плане по ходу движения воды, однако на некоторых установках для очистки природных и сточных вод флотаторы вытянуты в плане в направлении, перпендикулярном движению воды. Последний вид флотаторов имеет некоторые преимущества: короче путь движения потока воды, более просто удаление пены с поверхности воды. Но в этом случае возникают трудности с равномерным распределением водовоздушного раствора в объеме обрабатываемой воды. Чтобы добиться равномерности распределения, используют коллектор с большим количеством ответвлений, на которых устанавливают регулировочные краны. Управление этими кранами производят с помощью штоков, выведенных над поверхностью воды в камере. Для улучшения использования всего объема флотатора в некоторых случаях устанавливают продольные перегородки.

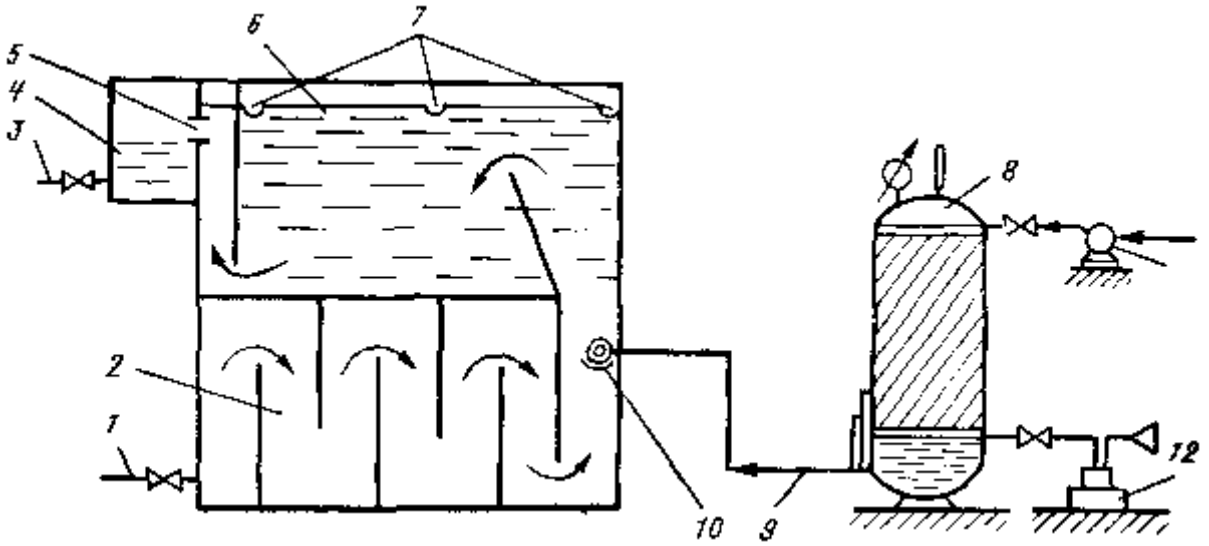

Рис. 5.11. Флотатор совмещенный с перегородчатой камерой хлопьеобразования: 1, 3 – подача исходной и отвод обработанной воды; 2 – камера хлопьеобразования; 4 – сборный карман; 5 – окна для отвода обработанной воды; 6, 7 – лотки для сбора и отвода пены; 8 – напорный резервуар; 9 – подача водовоздушной смеси; 10 – отражатель; 11 – насос, 12 – компрессор

Во входной части прямоугольной флотационной камеры устанавливают под углом 60...70° к горизонтали в сторону движения воды струенаправляющую перегородку. Днище флотационной камеры устраивают с уклоном 0,01 к трубопроводу для опорожнения.

Скорость ввода обрабатываемой воды во флотатор не должна превышать скорости ее выхода из камеры хлопьеобразования, поэтому скорость движения обрабатываемой воды над струенаправляющей перегородкой назначают 0,016...0,02 м/с. Равномерное распределение водовоздушной смеси в объеме обрабатываемой воды и формирование мелких воздушных пузырьков достигаются устройством перфорированного трубопровода и размещенного под ним на расстоянии 8...10 см кожуха из материала, стойкого к кислородной коррозии. Распределительную трубу располагают на расстоянии 0,25...0,35 м от дна во входной части флотатора в отсеке, образованном торцовой стенкой аппарата и струенаправляющёй перегородкой. Скорость выхода водовоздушной смеси из отверстий распределителя принимают 20...25 м/с, диаметр отверстий 5... 8 мм. Отверстия следует располагать равномерно по нижней образующей трубы линейно.

Отвод осветленной воды из флотатора должен производиться равномерно из нижней части камеры с помощью подвесной стенки, направляющей поток к отводу воды из аппарата, либо с помощью отводящей системы из перфорированных труб. Скорость движения воды под подвесной стенкой или в отверстиях водосборной системы принимают 0,9...1,2 м/с.

Время флотационного осветления воды для флотатора с радиальным движением воды составляет 10...12 мин. Для насыщения воды воздухом используют 10 % воды, прошедшей очистку. Расход воздуха составляет 0,6...0,75% от расхода воды. Во флотаторах круглой формы узел сбора и

удаления пены проще, однако системы для распределения водовоздушного раствора и обрабатываемой воды сложнее.

При строительстве новых очистных сооружений предпочтение следует отдавать флотаторам с горизонтальным движением воды прямоугольной формы в плане, совмещенным с камерами хлопьеобразования, с целью предотвращения разрушения хлопьев, сформированных в процессе коагуляции взвеси в воде.

Образование флотационной пены на поверхности воды и способы ее удаления. Пена образуется на поверхности воды в результате всплывания пузырьков воздуха, несущих на себе удаляемые из воды примеси. При флотации природных вод образующаяся пена должна быть достаточно прочной и не допускать обратного попадания загрязнений в воду. Кроме того, пена должна обладать определенной подвижностью при перемещении ее к сбросным устройствам. Устойчивость и подвижность пены зависит от свойств и количества реагентов и загрязнений, вносимых в пенный слой. Стабилизации пены способствует наличие в воде хлопьев коагулянта, мелких частиц взвеси и поверхностно-активных веществ.

Удаление пены из флотатора производят либо кратковременным подъемом уровня воды с отводом ее через подвесные лотки, расположенные равномерно по площади камеры, либо с помощью скребковых механизмов, перемещающих пену к сборным лоткам. Потери воды при сбросе пены подъемом уровня воды принимают 1...1,5% от расхода обрабатываемой воды.

При удалении пены скребковыми механизмами скорость движения скребков в прямоугольных камерах принимают до 0,02 м/с, в круглых – окружную скорость 0,015...0,02 м/с, при частоте вращения 6...10 $с^{-1}$. Днища лотков выполняют с уклоном 0,025 в сторону отвода пены. Верхние кромки лотков располагают на одной общей отметке на 10...15 мм выше уровня воды во флотаторе.

В зарубежной практике наибольшее распространение получили скребки-транспортеры, которые применяют для удаления очень вязких пен. Во флотаторах, имеющих в плане круглую форму, применяют вращающиеся скребки. На установках флотационного осветления используют даже лопастные пеносъемники, которые устанавливают у сливной кромки пеносборного желоба. Кроме того, применяют отдельные скребки, установленные горизонтально во флотационной камере на подвижных тележках. При перемещении тележки по ходу движения воды скребок удаляет пену, при обратном ходе тележка скребок поднимается над поверхностью воды.

В установках электрофлотации обрабатываемая вода движется в межэлектродном пространстве, при этом на поверхности электродов (нерастворимых или растворимых) образуются пузырьки водорода или кислорода, которые флотируют примеси воды. При применении растворимых электродов параллельно с электрофлотацией идет процесс электрокоагуляции, что повышает эффект очистки воды.