



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)»
Кафедра инженерного проектирования

М. А. Яблокова, Е.А. Пономаренко

ТЕХНОЛОГИЯ ВОДОПОДГОТОВКИ

Учебное пособие



Санкт-Петербург
2017

Яблокова, М.А. Технология водоподготовки: учебное пособие / М. А. Яблокова, Е.А. Пономаренко. – СПб.: СПбГТИ (ТУ), 2017. – 125 с.

Даны базовые сведения о показателях качества воды и требованиях, предъявляемых к воде различными потребителями. Приведены основные технологические схемы улучшения качества воды природных источников. Описаны принцип действия и методы расчета оборудования водоподготовки: коагуляторов, емкостных и тонкослойных отстойников, гидроциклонов, зернистых фильтров, аппаратов для дезинфекции и ультрафильтрационной доочистки воды. Приведены примеры расчетов водоподготовительного технологического оборудования, а также контрольные задания для студентов-заочников.

Учебное пособие адресовано студентам заочного отделения механического факультета, изучающим дисциплины «Технология водоподготовки», «Водоснабжение и водоотведение». Предназначено для обучающихся по направлению бакалавриата 08.03.01 «Строительство», направленности «Промышленное и гражданское строительство».

Учебное пособие формирует у студентов следующие профессиональные компетенции (ПК):

- способность участвовать в проектировании и изыскании объектов профессиональной деятельности (ПК-4);
- способность осуществлять и организовывать техническую эксплуатацию зданий, сооружений объектов жилищно-коммунального хозяйства, обеспечивать надежность, безопасность и эффективность их работы (ПК-6).

Может быть полезно студентам очной формы обучения.

Рис.34, библиогр. назв.15, табл. 8.

Рецензенты: 1 Военный инженерно-технический институт в составе Военной академии материально-технического обеспечения имени генерала армии А.Н. Хрулёва, А.В.Александрин, канд. арх. наук, профессор;

2 Н.А. Незамаев, канд. техн. наук, доцент кафедры машин и аппаратов химических производств СПбГТИ (ТУ).

Издание подготовлено в рамках выполнения внутривузовского задания по оказанию образовательных услуг.

Утверждено на заседании учебно-методической комиссии механического факультета 09.01.2017 г.

Рекомендовано к изданию РИС СПбГТИ (ТУ)

© Яблокова М.А., Пономаренко Е.А.

Введение

В последние годы все более очевидным становится факт, что угроза существованию мирового сообщества таится в катастрофической экологической ситуации. Одно из наиболее серьезных опасений вызывает недостаток питьевой воды, ее качественные изменения, несоответствие санитарно-гигиеническим требованиям, серьезные последствия потребления недоброкачественной питьевой воды для здоровья населения.

В Российской Федерации проблема обеспечения населения доброкачественной питьевой водой во многом остается нерешенной, а в ряде регионов приобретает кризисный характер. Низкий уровень санитарно-эпидемиологического благополучия населения республик Бурятия, Дагестан, Калмыкия, Приморского края, Архангельской, Калининградской, Кемеровской, Курганской, Томской, Ярославской и других областей в значительной степени определяется дефицитом и неудовлетворительным качеством питьевой воды.

Процесс получения и подачи населению кондиционной питьевой воды зависит от ряда факторов, основными из которых являются: состояние источников водоснабжения, состояние централизованных систем подготовки питьевой воды, санитарно-техническое состояние водопроводных систем, уровень лабораторного контроля качества воды на всех этапах ее подготовки и подачи населению.

В общем объеме подаваемой воды 68% занимает вода поверхностных водоемов. Ухудшение их состояния объясняется рядом причин, основными из которых являются:

- сокращение годового стока рек (например, Волги на 10%; Дона, Кубани, Терека – на 25-40%);
- неудовлетворительное состояние зон санитарной охраны, в том числе, постоянные нарушения требуемых режимов в этих зонах;
- интенсивное загрязнение открытых водоемов неочищенными и недостаточно очищенными сточными водами.

В 2016 году количество нормативно очищенных вод составило лишь 9 % от их общего объема 70 км³. 12% стоков сбрасывались в водоёмы без какой бы то ни было очистки; остальные – очищались частично, недостаточно. Зарегистрировано около тысячи аварийных залповых выбросов неочищенных стоков в открытые водоемы. В целом же в 2016 году в открытые водоемы поступило около 900 тыс. тонн взвешенных веществ, 20 тыс. тонн нефтепродуктов, 160 тыс. тонн аммонийного азота, 55 тыс. тонн

фосфора, около 50 тыс. тонн соединений железа, более 2 тыс. тонн цинка, соединений меди, фенола и др. 30% проб воды поверхностных источников показали превышение гигиенических нормативов по санитарно-химическим и 24% - по бактериологическим показателям. Крайне загрязнены реки Волга, Дон, Северная Двина, Урал, Уфа, Тобол, Томь, река Москва ниже города Москвы, река Упа ниже города Тулы, отдельные участки реки Белой.

Концентрация нефтепродуктов в местах водозабора достигает порой сотен и тысяч ПДК, фенола – (2-7) ПДК, соединений азота – (10-16) ПДК, ионов тяжелых металлов – десятков ПДК. Лишь 1% исходной воды поверхностных источников соответствует первому классу качества, обеспечивающему получение кондиционной питьевой воды при существующих технологиях водоподготовки.

Несмотря на несколько лучшее санитарно-гигиеническое состояние подземных источников, в последние годы наблюдается их загрязнение железом, фтором, бором, марганцем, стронцием и другими микроэлементами. Выявлено около 1200 районов значительного загрязнения подземных вод, из них 80% - в Европейской части России. Наиболее интенсивные загрязнения подземных источников водоснабжения обнаружены в Московской, Смоленской, Орловской, Оренбургской, Нижегородской и Тульской областях.

Известно, что длительное потребление воды, содержащей даже сравнительно малые концентрации некоторых химических загрязнений, вызывает хроническое отравление организма.

Наличие в воде железа, марганца, меди, цинка, многих органических примесей ухудшает ее вкусовые (органолептические) показатели. Цинк, свинец и некоторые органические загрязнения делают воду токсичной. Ряд веществ, являясь канцерогенами, могут стать причиной образования злокачественных опухолей.

Все это привело к тому, что приготовление воды питьевого качества из природных водоисточников превратилось в сложное промышленное производство.

Интенсивное развитие промышленности и энергетики, сельского и коммунального хозяйства, значительный рост водопотребления, возросшие требования к качеству воды обуславливают строительство новых систем и сооружений водоснабжения, расширение и реконструкцию существующих.

В связи с этим будущий инженер-строитель должен иметь четкие представления не только об элементах систем водоснабжения, их значении и взаимосвязи. Он должен овладеть теоретическими основами процессов и

методов улучшения качества воды, приобрести практические навыки по расчету, проектированию и эксплуатации водоочистных сооружений.

В настоящем учебном пособии изложены сведения об основных показателях качества воды, описаны современные методы водоподготовки, сооружения и технологические схемы улучшения качества воды в соответствии с последними нормативными документами по водоснабжению, в частности СП 31.13330.2012 (актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84), ГОСТ Р 51232-98, СанПиН 2.1.4.10749-01 и др. [2-4].

Наиболее полно изложен материал, связанный с подготовкой воды для питьевых целей. Кратко освещены вопросы подготовки воды для промышленного водоснабжения, а также обработка воды для борьбы с коррозией и биологическими обрастаниями.

Приведены схемы современных водоочистных сооружений, использованы новые типовые проекты.

1 Основные показатели качества воды

Для определения качества питьевых и природных вод требуется проведение большого числа различных анализов - химических, физико-химических, санитарно-биологических.

Основными задачами, решаемыми на основе анализов, являются:

- оценка санитарно-токсикологического состояния воды;
- определение пригодности воды для конкретного вида потребления;
- определение степени и характера загрязненности воды;
- выявление возможности применения тех или иных методов очистки воды;
- управление процессами очистки воды и контроль работы сооружений;
- оценка эффективности работы отдельных водоочистных сооружений и всей станции водоподготовки в целом и т.п.

Основные показатели качества воды, используемые в технологии очистки природных и сточных вод, можно разбить на пять основных категорий:

- 1) органолептические;
- 2) физико-химические;
- 3) химические;
- 4) биохимические;
- 5) санитарно-бактериологические.

К *органолептическим* показателям относятся цветность (окраска), запах, привкус, прозрачность, мутность.

Цветность (окраска) - один из наиболее важных показателей. Цветность природной воды обусловлена присутствием в воде гумусовых и дубильных веществ, белковых и углеродных соединений, входящих в состав живых и растительных организмов, населяющих воду и являющихся продуктами их жизнедеятельности или распада. Наряду с этим окраска воды может быть вызвана присутствием соединений железа, сточных вод некоторых производств или «цветением» водоемов. При массовом развитии водорослей из группы протококковых вода приобретает светло-зеленую окраску, диатомитовых – изумрудно-зеленую.

Цветность воды, содержащей большое количество взвешенных веществ, определяют после предварительного отстаивания или фильтрования.

Следует отметить, что прямого соответствия между цветностью и количеством органических веществ, вызывающих окраску, нет. Поэтому степень цветности выражают не в единицах концентрации какого-то вещества, а в особых единицах - градусах цветности. Измерение

производится путем сравнения пробы (как правило, в фотоколориметре) со стандартным раствором солей платины и кобальта (K_2PtCl_6 и $CoCl_2$). Окраска воды, соответствующая окраске стандартного раствора, содержащего 0,1 мг/л Pt, оценивается как 1 градус цветности платино-кобальтовой (Pt-Co) шкалы. Цветность питьевой воды не должна превышать 20 градусов Pt-Co шкалы.

Еще один органолептический показатель качества воды - *запах*.

Природная вода может иметь слабый запах сероводорода. Запахи присущи и некоторым водным организмам, в частности, плесеням и актиномицетам. Если природная вода имеет иные запахи, то это значит, что в нее попали сточные воды.

Запах бытовых стоков довольно характерен: это запах разложения органических веществ. Запах производственных стоков весьма разнообразен и зависит от вида производства.

Запах питьевой воды определяется способом ее обработки. Так, например, после хлорирования может появиться неприятный запах хлорфенолов.

При определении запаха сначала устанавливают его характер (гнилостный, фенольный, болотно-тинистый и т.п.), а затем интенсивность, оцениваемую либо в баллах по пятибалльной шкале, либо на основе «порогового испытания», при котором определяют степень разбавления пробы до исчезновения запаха.

Органолептический показатель «*привкус*» определяется только для питьевых вод. Привкус описывают как соленый, сладкий, горький, кислый, щелочной, металлический и пр. Это определение субъективно, так как зависит от вкусового восприятия и опыта исследователя.

Пятибалльная шкала запахов и привкусов воды

0 баллов - запах и привкус не обнаруживается;

1 балл - очень слабые запах или привкус (обнаруживает только опытный исследователь);

2 балла - слабые запах или привкус, привлекающие внимание неспециалиста;

3 балла - заметные запах или привкус, легко обнаруживаемые и являющиеся причиной жалоб;

4 балла - отчётливые запах или привкус, которые могут заставить воздержаться от употребления воды;

5 баллов - настолько сильные запах или привкус, что вода для питья совершенно непригодна.

К органолептическим показателям относится и *степень прозрачности*, которая позволяет оценить наличие в воде нерастворенных и коллоидных примесей. Прозрачность определяют в цилиндрах из бесцветного стекла высотой 30 ÷ 50 см с плоским дном. Проба считается прозрачной, если через столб воды в цилиндре, помещенном на расстоянии 2 см от контрольного шрифта, можно различить указанные в нем буквы и цифры или же четко видеть крест, нанесенный черными линиями толщиной 1 мм. Высота столба воды в сантиметрах и есть прозрачность воды «по шрифту» или «по кресту». Прозрачность питьевой воды должна быть не менее 30 см.

Мутность воды (понятие, обратное прозрачности) определяют на мутномерах (в мг/л) путем сравнения в одинаковых условиях освещения испытуемой воды с имитатами - суспензиями трепела, каолина или инфузальной земли, характеризующими различную степень загрязнения воды. Мутность можно определить фотоэлектроколориметром. По ГОСТ 2874 – 82 мутность питьевой воды не должна превышать 1,5 мг/л.

К *физическим показателям* качества воды относятся температура, вязкость, плотность, поверхностное натяжение. К *физико-химическим* - реакция среды (рН), жесткость, электропроводность, содержание взвешенных веществ, сухой остаток, окислительно-восстановительный потенциал (Eh) и некоторые другие.

Очень важное значение для технологии очистки воды имеет ее температура. Она влияет на вязкость воды и, следовательно, на скорость осаждения взвешенных в воде твердых частиц, а также на растворимость газов, в частности, кислорода. Температура воды учитывается в расчетах многих очистных сооружений.

Реакция среды может быть кислой (рН < 7), щелочной (рН > 7) и нейтральной (рН = 7). Вода хозяйственно-питьевого назначения должна иметь рН = 6,5 ÷ 8,5. Такое требование связано с необходимостью удовлетворения физиологических особенностей человека и уменьшения коррозии материалов труб и сооружений.

Для характеристики загрязненности воды твердыми примесями применяют такой физико-химический показатель, как *содержание взвешенных веществ*. Под содержанием взвешенных веществ понимают количество загрязнений, которое задерживается на бумажном фильтре при фильтрации пробы при атмосферном давлении или слабом разрежении. Фильтр с взвешенными веществами высушивают при 105⁰С до постоянного

веса, и по разности веса фильтра до и после фильтрации определяют количество взвешенных веществ в воде.

Оседающими веществами называют часть взвешенных веществ, которые оседают на дно отстойного цилиндра высотой 0,3 м за 2 часа отстаивания в покое. Длительность отстаивания, равная двум часам, определена на основании экспериментальных наблюдений, которые показали, что дальнейшее увеличение продолжительности процесса практически не изменяет результата, достигнутого за это время.

Под *сухим остатком* подразумевают сумму всех примесей воды, определяемую путем выпаривания пробы. В известном смысле, величина сухого остатка характеризует степень общей загрязненности воды. Выпаривание пробы проводят на кипящей водяной бане, высушивание чашки - при 105⁰С. В процессе обработки из пробы удаляются газы, летучие компоненты и вещества, разлагающиеся с образованием легколетучих компонентов.

Плотный остаток - это сухой остаток, определенный из фильтрата пробы. Следовательно, разность двух показателей (сухого и плотного остатков) соответствует содержанию взвешенных веществ в пробе.

К физико-химическим показателям относятся также *потери при прокаливании сухого остатка* и *зольность* твердых примесей. Для выбора способа очистки часто нужно знать содержание органической и минеральной частей в сухом остатке. В этом случае высушенная твердая фаза подвергается прокаливанию при температуре «красного» каления (500-600⁰С). Углерод, водород, азот, сера и другие органические примеси при этом выгорают, т.е. улетучиваются в виде оксидов. Остаток, называемый золой, после охлаждения взвешивают. Результаты выражают либо в абсолютных значениях, либо в процентах. Потери при прокаливании - это абсолютное количество улетучившихся примесей; выражаются обычно в мг/л. Зольность - это отношение массы остатка после прокаливании к массе первоначально взятого сухого остатка; выражается в процентах.

Согласно СанПиН 2.1.4.1074-01 [4], растворенный (плотный) остаток в воде питьевого назначения не должен превышать 1 г/л (1000 мг/л). При употреблении человеком воды с повышенным содержанием солей наблюдается гиперминерализация организма, что вызывает различные функциональные заболевания. В случае несоблюдения этого условия вода должна подвергнуться опреснению. Величина растворенного остатка лимитируется и для воды, используемой при производстве кино- и фотопленки, капрона, капролактама, каучука, а также для питательной воды

паровых котлов. Так, котлы высокого давления требуют воду, величина растворенного остатка которой близка к нулю.

Хлориды и сульфаты (в мг/л или мг-экв/л) благодаря своей высокой растворимости присутствуют во всех природных водах обычно в виде натриевых, кальциевых и магниевых солей. При значительном содержании в воде хлоридов и сульфатов они являются причиной ее агрессивности по отношению к бетону. Воды, содержащие сульфат-ионы в количестве свыше 250 мг/л, оказывают разрушающее действие на бетонные конструкции вследствие образования гипса (результат реакции между сульфатами и известью цемента), что вызывает увеличение объема и образование трещин в бетоне. При значительном содержании в воде хлор-иона происходят выщелачивание и разрушение бетонного камня вследствие образования с известью растворимых хлористого магния и кальция.

Наличие в воде значительных концентраций хлоридов и сульфатов свидетельствует о повышенном растворенном остатке воды, что служит препятствием для использования подобной воды не только для питания паровых котлов, но и в производстве ряда полимеров, синтетического каучука, некоторых сортов бумаги и др.

Присутствие в питьевой воде значительных количеств сульфата натрия нарушает деятельность желудочно-кишечного тракта, в то время как сульфаты и хлориды магния и кальция обуславливают некарбонатную жёсткость воды.

Щелочность воды (в мг-экв/л) определяется суммой содержащихся в воде гидроксильных ионов и анионов слабых кислот – угольной, органических. Различают бикарбонатную, карбонатную и гидратную щелочность.

Щелочные металлы (в мг/л) в природных водах обычно представлены ионами калия и натрия с преобладанием последнего.

Жесткость воды обусловлена наличием в ней кальция и магния. Жесткость воды выражают в мг-экв/л (1 мг-экв/л жесткости равен 20,4 мг/л или 12,16 мг/л ионов магния). Различают карбонатную, некарбонатную и общую жесткость воды. Карбонатная жесткость обусловлена содержанием в воде карбонатных и бикарбонатных солей кальция и магния. Карбонатная жесткость легко устранима при кипячении воды, так как бикарбонаты распадаются с образованием углекислоты и выпадением в осадок карбоната кальция и гидроксида магния. Некарбонатная жесткость обусловлена кальциевыми и магниевыми солями серной, соляной, кремниевой и азотной

кислот. Сумма карбонатной и некарбонатной жесткости определяют общую жесткость.

Общая жесткость (Ж) воды

$$Ж = [Ca^{2+}]/20,04 + [Mg^{2+}]/12,16, \quad (1.1)$$

где $[Ca^{2+}]$ и $[Mg^{2+}]$ - концентрация в воде ионов соответственно кальция и магния, мг/л; 20,04 и 12,16 - эквивалентные массы соответственно Ca и Mg, мг/ мг·эquiv.

Для питья допускается использование относительно жестких вод ($Ж \leq 7 \div 14$ мг·эquiv/л), так как наличие солей кальция и магния не вредно для здоровья и не ухудшает вкусовых качеств воды. Использование жесткой воды для хозяйственных целей вызывает ряд неудобств: образуется накипь на стенках посуды, увеличивается расход мыла при стирке, медленно развариваются мясо и овощи. Для производственных целей использование жесткой воды часто совершенно недопустимо. Так, жесткая вода непригодна для систем оборотного водоснабжения, для питания паровых котлов, для производства искусственных волокон, промывки нитей и тканей.

Железо и марганец присутствуют в природных водах в формах, зависящих от величин pH и содержания кислорода. Так, железо может находиться в форме двух- и трехвалентных ионов, органических и неорганических коллоидов, комплексных соединений, в форме тонкодисперсной взвеси сульфида и 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 форме органических комплексных соединений, коллоидов или тонкодисперсных взвесей. Обычно содержание железа и марганца в природных водах не превышает нескольких десятков мг/л, а в подземных водах достигает нескольких сотен мг/л и более. Длительное употребление человеком воды с повышенным содержанием железа может привести к заболеванию печени (гемосидерит). Такая вода неприятна на вкус, причиняет неудобства в быту, поэтому содержание железа в питьевой воде не должно превышать 0,3 мг/л, а марганца – 0,1 мг/л.

Присутствие в воде железа и марганца может способствовать развитию в трубах и теплообменных аппаратах железистых и марганцевых бактерий, продукты жизнедеятельности которых вызывают уменьшение сечения, а иногда и полную закупорку трубопроводов. Содержание железа и марганца

строго ограничено в воде, используемой при производстве пластмасс, киноплёнки, в текстильной и пищевой промышленности и т.п.

Окисляемость воды – количество кислорода, мг/л, эквивалентное расходу окислителя, необходимого для окисления примесей в данном объёме. Окисляемость обуславливается присутствием органических и некоторых легко окисляющихся неорганических примесей, таких, как железо (II), сульфиты, сероводород и др. В зависимости от применяемого окислителя различают окисляемость перманганатную и бихроматную. При этом окисляемость 1 мг O_2 /л соответствует окисляемости 0,253 мг/л $KMnO_4$.

Для питьевой воды окисляемость не лимитируется, но она ограничивается для питательной воды котлов, так как вызывает ее вспенивание, для охлаждающей воды из-за возможного биообрастания труб и аппаратуры, лимитируется для воды, используемой при изготовлении синтетических волокон и некоторых пластмасс. Характерно, что окисляемость воды после коагулирования, отстаивания и фильтрования снижается меньше, чем цветность.

Азотосодержащие вещества (ионы аммония, нитритные и нитратные) образуются в воде в результате восстановления нитритов и нитратов железом (II), сероводородом, гумусовыми веществами и т.д. либо вследствие разложения белковых соединений, вносимых в водоем сточными водами (в этом случае вода опасна в санитарном отношении). Наличие в питьевой воде более 50 мг/л нитратов приводит к нарушению окислительной функции крови, известному под названием метгемоглобинемии, поэтому, по ГОСТ 2874 – 82, содержание нитратов в питьевой воде не должно превышать 10 мг/л.

Кремний встречается в природных водах в форме органических и минеральных соединений. Количество кремния в воде поверхностных источников невелико и варьируется от десятых долей до нескольких мг/л, а в подземных водах оно достигает десятков мг/л. Содержание кремния в питьевой воде лимитируется, а в питательной воде котлов высокого давления оно недопустимо из-за возможности образования плотной силикатной накипи.

Соединения фосфора встречаются в природных водах в виде суспендированных частиц минерального и органического происхождения, в виде ионов ортофосфорной кислоты или сложных органических комплексов. В природных водах соединения фосфора присутствуют в малых количествах, но оказывают существенное влияние на водную растительность.

Концентрация соединений фосфора в питьевой воде регламентирована величиной 1 мг/л.

Фтор в природных водах содержится в концентрациях до 12 мг/л (артезианские воды) и более. Однако подавляющее большинство источников централизованного водоснабжения в нашей стране характеризуется содержанием фтор-иона до 0,5 мг/л. Фтор является активным в биологическом отношении микроэлементом, содержание которого в питьевой воде во избежание кариеса или флюороза должно быть 0,7 – 1,5 мг/л.

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

Токсичные вещества (мышьяк, стронций, бериллий и т.д.), а также радиоактивные (уран, радий) обычно попадают в водоемы со сбросом сточных вод. Содержание их в питьевой воде ограничено СанПиН 2.1.4.1074-01.

Растворимые в воде газы – кислород, уголекислота, сероводород, метан и азот также имеют значения для оценки ее качества. Так, уголекислота, сероводород, кислород при определенных условиях коррозийные свойства по отношению к металлам и бетонам.

Уголекислота содержится во всех природных водах в концентрациях от нескольких единиц (поверхностные воды) до сотен мг/л (подземные воды). В зависимости от рН воды уголекислота присутствует в ней в виде свободной, представляющей собой растворенный в воде газ CO_2 , полусвязанной, т.е. в виде карбонат-ионов HCO_3^- , и связанной уголекислоты, т.е. в виде бикарбонат-ионов CO_3^{2-} . Разница между свободной и равновесной уголекислотой называется агрессивной уголекислотой, которая растворяет карбонат кальция, разрушающе воздействует на бетон, катализирует ход электрохимической коррозии металла. Об агрессивности или стабильности воды по отношению к бетону или металлу можно судить по концентрации агрессивной уголекислоты.

Для определения стабильности воды широко используют метод Ланжелье [1]. О стабильности воды судят по отношению рН испытуемой воды и рН_s равновесного насыщения воды карбонатом кальция, которое находят по данным химического анализа. Если рН меньше рН_s, то вода содержит агрессивную уголекислоту и будет разрушающе воздействовать на бетон и металл. При рН воды больше рН_s вода способна к отложению

карбоната кальция. Как правило, в поверхностных водах присутствие агрессивной углекислоты исключено. Напротив, в подземных водах оно бывает значительным.

Сероводород в природных водах встречается органического (продукт распада органических соединений) и неорганического (растворение минеральных солей – серного колчедана, гипса и др.) происхождений. Сероводород в поверхностных водах присутствует в незначительных количествах, в подземных водах его содержание составляет несколько десятков мг/л. Наличие сероводорода в воде придает ей неприятный запах, способствует коррозии металла и может вызвать зарастание трубопроводов в результате интенсивного развития серобактерий. Сероводород в зависимости от рН воды может присутствовать в виде слабо диссоциированной кислоты H_2S , гидросульфидных HS^- или сульфидных S^{2-} ионов, поэтому величина рН имеет важное значение при решении задачи удаления сероводорода из воды.

Кислород попадает в воду при ее контакте с воздухом. В артезианских водах кислород отсутствует, а в поверхностных его концентрации довольно велики. В поверхностных водах содержание кислорода меньше теоретического (равновесного) за счет потребления его различными организмами, окисления органических остатков и т.п. Резкое снижение содержания кислорода в воде указывает на ее загрязнение. Растворенный в воде кислород интенсифицирует коррозию металла, поэтому в питательной воде теплоэнергетических установок наличие кислорода строго ограничено.

Азот в природные воды проникает из воздуха, при разложении органических остатков, а также при восстановлении соединений азота денитрифицирующими бактериями. Образующийся в воде в процессе гниения растений аммиак существенно влияет на технологию хлорирования воды.

Метан присутствует в природных водах, используемых для водоснабжения, как правило, в незначительных количествах. Однако в болотных водах, где в больших объемах протекают процессы разложения клетчатки растительных остатков, содержание метана доходит до 30 мг/л и более.

Гидробионты, населяющие природные воды, в процессе жизнедеятельности влияют не только на состав окружающей водной среды, но и на качество воды. Они подразделяются на *планктон* – обитатели, пребывающие в толще воды от дна до поверхности; среди них различают плавающие, пассивно парящие и полуподводные (плейтон) организмы; взвешенные в воде их остатки органического и неорганического

происхождения называют *детритом*; *бентос* – обитатели, находящиеся на дне водоема; среди них встречаются подвижно или неподвижно прикрепленные, свободно лежащие и ползающие по дну организмы. *Нейстон* – организмы, населяющие поверхностную пленку воды и адаптировавшиеся к жизни в специфических условиях ее поверхностного натяжения; *пагон* – организмы (моллюски, ракообразные, коловратки и др.), пребывающие зимой в толще льда в состоянии анабиоза, оживающие весной и находящиеся среди бентоса или планктона.

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

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

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

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

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

Оценка микробиологического качества воды проводится с целью определения ее санитарно-эпидемиологической опасности или безопасности для здоровья человека.

Прямое количественное определение возбудителей всех инфекций в воде неосуществимо в связи с многообразием их видов и трудоемкостью анализа. Поэтому санитарно-бактериологическая оценка качества воды основана на косвенном определении двух основных показателей, характеризующих потенциальную возможность заражения воды патогенными микроорганизмами: *микробного числа* и *Coli-индекса* (числа бактерий группы Coli). Первый показатель дает представление об общей обсемененности воды микробами и представляет собой число клеток в 1 мл воды. Второй показатель - число бактерий группы Coli (кишечная палочка) в 1 мл воды. Он характеризует загрязнение воды выделениями людей и животных и т.п. Определение микробного числа и Coli-индекса проводят путем посева 1 мл исследуемой воды на чашки Петри. Посев инкубируют при температуре 37⁰С в течение 24 часов. Затем проводят подсчет в чашке Петри общего числа колоний и числа колоний кишечной палочки, имеющих характерный внешний вид. Минимальный объем испытуемой воды, мл, приходящийся на одну кишечную палочку, называется коли-титром, а количество кишечных палочек в 1 л воды – коли-индексом. Согласно СанПиН 2.1.4.1074-01, допускается коли-индекс до 3, коли-титр – не менее 300, а общее число бактерий в 1 мл – до 100.

2 Требования, предъявляемые к воде различными потребителями

В зависимости от целевого назначения к воде предъявляют разнообразные требования, согласно которым ее можно классифицировать: для хозяйственно – питьевых целей, коммунальных предприятий, а также для нужд пищевой и некоторых других отраслей промышленности; охлаждения (технологического оборудования, пара, жидких и газообразных продуктов, доменных и мартеновских печей, конденсаторов турбин и паровых машин; вагранок, кузнечных молотов и др.); нужд паросилового хозяйства (питание паровых котлов ГРЭС и ТЭЦ); технологических нужд промышленности, где вода может входить в состав продукции или контактировать с ней; для заводнения нефтяных пластов; нужд сельского хозяйства.

Хозяйственно-питьевая вода должна быть безвредна для здоровья человека, иметь хорошие органолептические показатели и быть пригодной для использования в быту. Основные показатели качества хозяйственно-питьевой воды регламентированы СанПиН 2.1.4.1074-01 «Вода питьевая».

Мутность.....	до 1,5 мг/л
Цветность	до 20 град
Запахи и привкусы при 20 °С.....	до 2 баллов
Хлориды	до 350 мг/л
Сульфаты	до 500 мг/л
Остаточный алюминий	до 0,5 мг/л
Водородный показатель.....	6,5 – 8,5
Общая жесткость.....	до 7 мг·экв/л
Фтор.....	0,7–1,5 мг/л
Железо	до 0,3 мг/л
Марганец	до 0,1 мг/л
Бериллий.....	до 0,0002 мг/л
Молибден	до 0,05 мг/л
Мышьяк	до 0,05 мг/л
Свинец	до 0,1 мг/л
Селен	до 0,001 мг/л
Стронций.....	до 7 мг/л
Радий-226.....	$1,2 \cdot 10^{-10}$ Ки/л
Медь.....	до 1 мг/ л
Цинк.....	до 5 мг/ л

Гексаметафосфат	до 3,5 мг/ л
Триполифосфат.....	до 3,5 мг/ л
Полиакриламид.....	до 2 мг/л
Стронций-90.....	$4 \cdot 10^{-10}$ Ки/л
Нитраты	до 10 мг/л
Общее количество бактерий в 1 мл.....	до 100
Коли-индекс.....	до 3
Коли-титр.....	более 300

Подача потребителям воды с отклонениями ее качества от требований ГОСТ должна быть согласована с местными санитарными органами.

Отдельные производства пищевой промышленности, помимо регламентаций СанПиН 2.1.4.1074-01, предъявляют к воде дополнительные требования. Так, в воде, используемой в пивоварении, не должны содержаться сульфаты, а концентрация железа не должна превышать 0,1 мг/л; в воде для винокурного производства не должно содержаться хлористых магния и кальция; в воде для сахарного производства должно быть минимальное солесодержание и т.д.

Вода для охлаждения предназначена либо для охлаждения непрерывно работающих агрегатов, либо для отведения теплоты от продуктов производства. Вода при охлаждении может использоваться прямотоком, т.е. после однократного применения производится ее сброс в водоем, или с возвратом для многократного применения после охлаждения в градирне или брызгальном бассейне.

Качество охлаждающей воды не нормируется, так как оно зависит от условий применения. При использовании охлаждающей воды не должно быть отложений в трубах и аппаратах, по которым она подается, так как отложения затрудняют теплопередачу и сокращают живое сечение, снижая интенсивность циркуляции и эффект охлаждения. Вода, используемая для охлаждения, не должна содержать крупных минеральных взвесей, большого количества железа и органических веществ во избежание засорения или биообрастания трубок холодильных аппаратов и конденсаторов. Образование накипи из карбоната кальция в прямоточных охлаждающих системах, как правило, не наблюдается. Однако в оборотных системах при нагреве воды теряется углекислота и возрастает вероятность накипеобразования. Этот процесс усиливается с повышением содержания в исходной воде бикарбоната кальция и интенсивности упаривания воды в системе, с увеличением потери углекислоты, с уменьшением содержания в

охлаждающей воде органических веществ, которые препятствуют выпадению в осадок карбоната кальция, с повышением температуры нагрева охлаждающей воды и т.д. Следовательно, качество воды, используемой для охлаждения, при котором в холодильных аппаратах не происходит зарастания живого сечения и не возникает коррозии, должно определяться для конкретных условий специальным расчетом с учетом изложенных выше факторов.

Вода для паросилового хозяйства не должна образовывать накипи, вызывать коррозию металла и вспенивание котловой воды, не должна способствовать уносу солей с паром. Использование жесткой воды приводит к накипеобразованию на поверхности нагрева, что ухудшает теплопередачу, вызывает перерасход топлива и перегрев металла, а в конечном счете в результате образования свищей и *отдулин* (дефект поверхности, представляющий собой локальную пологую выпуклость, образовавшуюся вследствие местного перегрева металла) происходит разрыв экранных и кипяточных труб и др.

Вспенивание котловой воды вызывается наличием фосфатов, щелочей, нефти, смазочных масел и синтетических поверхностно-активных веществ. Оно приводит к загрязнению пара и отложению примесей на лопатках турбин. Хлориды и сульфаты способствуют уменьшению вспенивания, коагулируя коллоидные соединения фосфатов.

При оценке качества питательной воды котлов особое внимание следует уделять щелочам, которые являются активными пептизаторами и переводят коллоидные системы в суспензии крупнодисперсных частиц, создавая опасность загрязнения пара. Вместе с тем, присутствие в воде щелочи значительно уменьшает растворимость соединений железа, предотвращая коррозию металла. В этих условиях образующийся при коррозии гидроксид железа (II), выделяется из раствора на поверхность металла, образуя плотную защитную пленку. Поэтому рекомендуется поддерживать в питательной воде минимальное содержание щелочи – 25-50 мг/л едкого натра. Наличие в питательной воде котлов высокого давления кремниевой кислоты приводит к образованию плотной накипи с низкой теплопроводностью.

К воде для технологических нужд промышленности в зависимости от ее целевого назначения могут предъявляться самые разнообразные требования. Так, в воде, используемой в горнодобывающей промышленности при добыче, отмывке, сортировке, гидротранспорте и обогащении полезных ископаемых, должны отсутствовать грубые взвеси. Весьма специфическим

требованиям иногда должна отвечать вода, используемая для обработки готовой продукции, а также вода, входящая в состав продукта.

Ряд промышленных предприятий предъявляет к воде требования, значительно превышающие лимиты СанПиН 2.1.4.1074-01. Например, в воде, используемой для изготовления киноплёнки, некоторых сортов бумаги, не должно содержаться марганца, железа, кремнекислоты, ограничивается окисляемость воды и содержание хлоридов. В воде, используемой для приготовления растворов кислот и щелочей, красителей, моющих средств, жесткость должна быть не более 0,35 мг-экв/л.

Вода для заводнения нефтяных пластов не должна вызывать зарастания или закупорки отверстий фильтров и кольматации пор нефтесодержащей породы в результате образования нерастворимых соединений при взаимодействии с пластовой водой и частицами породы, а также при изменении температуры. Поэтому в закачиваемой воде должно содержаться не более 0,2 мг/л железа, 1 мг/л взвешенных веществ, 1 мг/л нефтепродуктов и др. Бикарбонаты в закачиваемой воде должны находиться в минимальном количестве, так как в результате их распада при нагревании воды образуется осадок карбоната кальция. Аналогичные явления протекают когда в закачиваемой воде присутствует растворенный кислород, который окисляя железо (II), и сероводород, присутствующий в пластовой воде, способствует кольматации пор нефтеносной породы.

Вода для нужд сельского хозяйства (птице- и зоофермы, орошение, мелиорация и др.) по своему качеству должна соответствовать целевому назначению. Согласно СНиП, для водопоя птиц, зверей и сельскохозяйственных животных на фермах надлежит подавать воду питьевого качества. Допускается водопой животных водой с повышенным минеральным составом [сульфаты - $(0,5 - 2,4) \cdot 10^3$, сухой остаток $(1-5) \cdot 10^3$, хлориды до $(0,4 - 2) \cdot 10^3$ мг/л, общая жесткость до 14 – 45 мг-экв/л], а также водопой водой с повышенной цветностью, с привкусом и запахами, при температуре 8-15⁰С. При этом нормы качества воды принимаются в зависимости от вида и возраста животных. Водопой зверей и птиц водой не питьевого качества в каждом конкретном случае должен быть разрешен органами ветеринарного надзора.

Основное требование к качеству воды, используемой для орошения, - это предотвращение засоления почв в результате испарения и аккумуляции в ней солей. Сульфаты магния и калия, углекислый и хлористый натрий засоляют почвы и делают их непригодными для агротехнических целей. Вода с небольшим содержанием сульфата кальция и углекислого магния с успехом

может быть использована для поливного земледелия. Минерализация поливных вод в зависимости от метеорологических, агротехнических факторов, условий полива и дренирования может изменяться в весьма широких пределах, не превышая 1,5 мг/л. Поливная вода с солесодержанием до 1 г/л пригодна для орошения, независимо от местных условий.

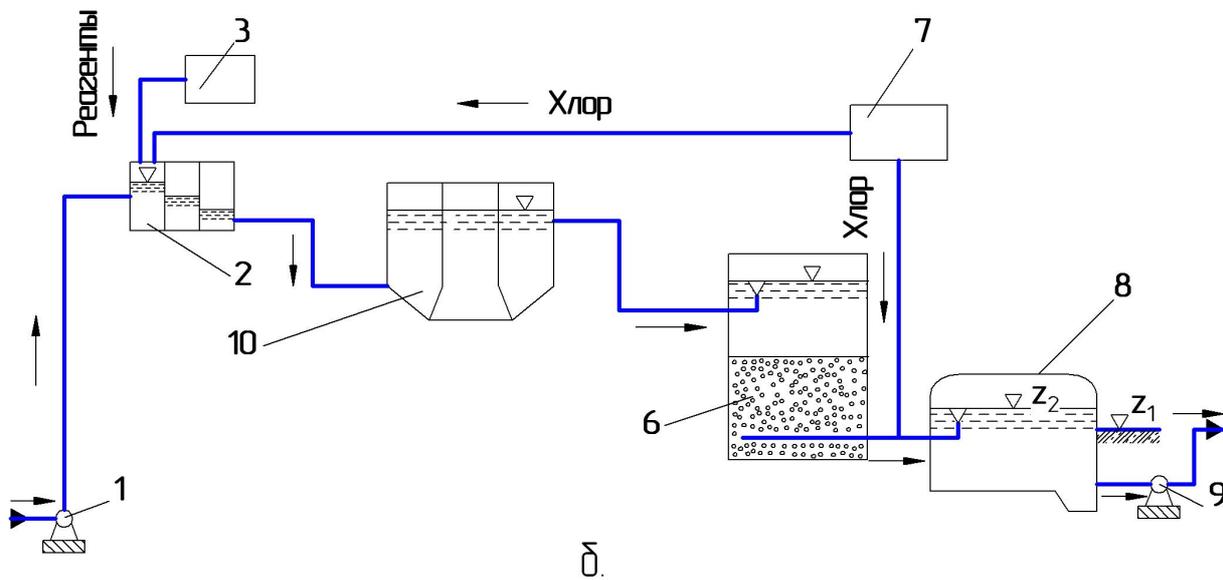
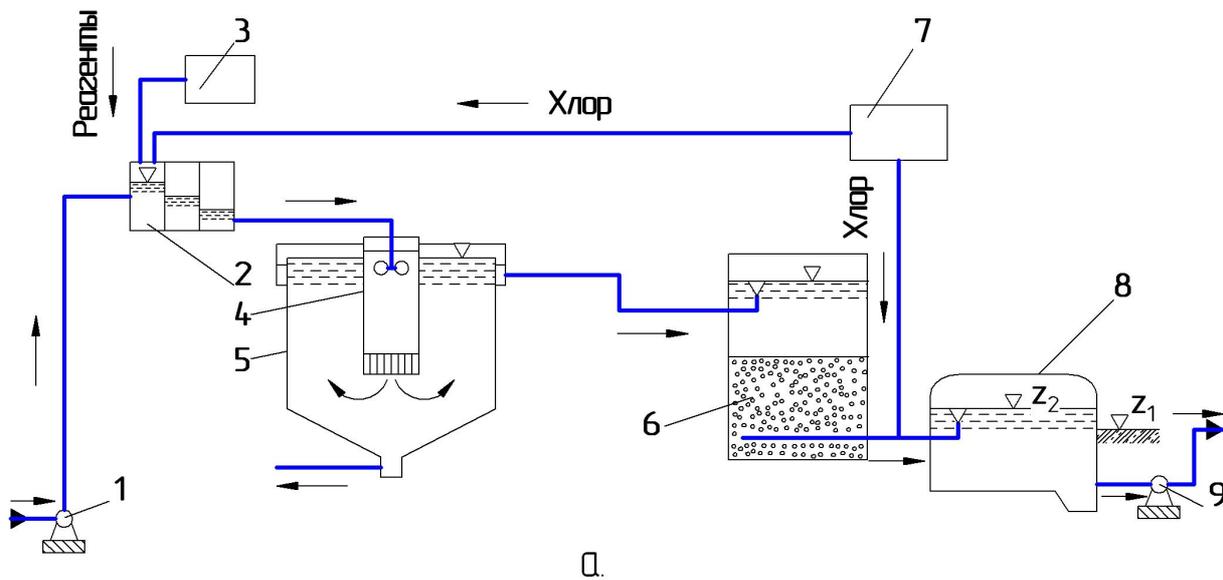
3 Сооружения для улучшения качества питьевой воды (сооружения водоподготовки)

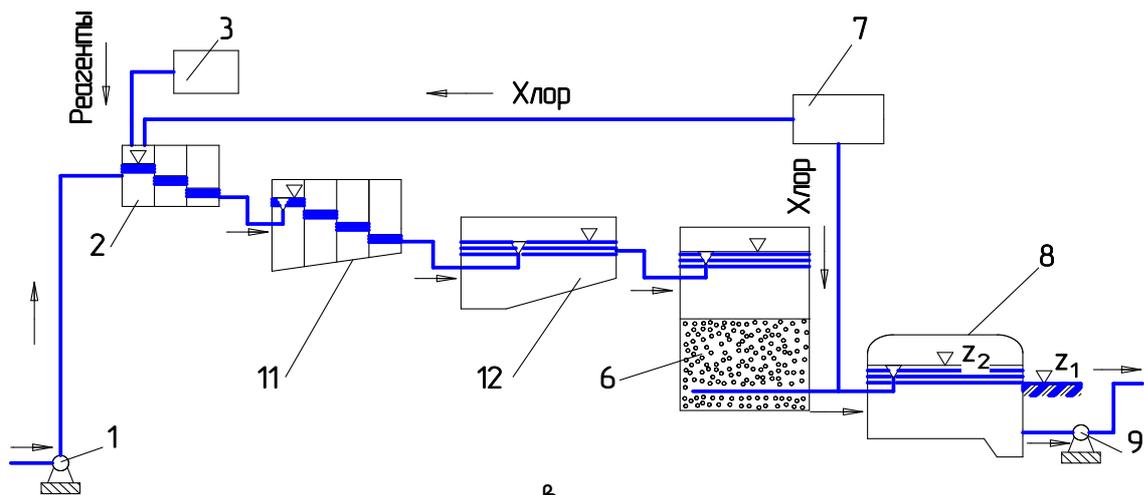
Сравнивая данные качества воды природных источников, полученные по результатам анализа, с требованиями, предъявляемыми к ней потребителями, намечают мероприятия для ее обработки.

В практике водоснабжения применяются следующие основные технологические операции для улучшения качества воды:

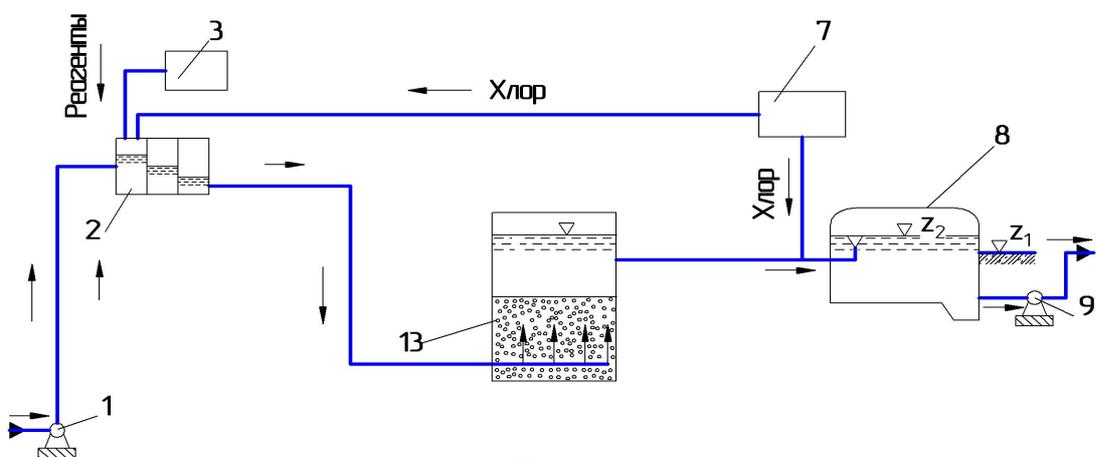
- осветление - удаление взвешенных веществ;
- обесцвечивание - устранение веществ, обуславливающих цветность воды;
- обеззараживание - уничтожение содержащихся в воде бактерий;
- опреснение - частичное удаление растворенных солей до норм на питьевую воду;
- умягчение - удаление солей кальция и магния, обуславливающих жесткость воды;
- обезжелезивание - освобождение воды от растворимых соединений железа;
- обесфторивание - удаление соединений фтора;
- фторирование - добавление в воду фтора;
- дегазация - удаление из воды растворимых газов (H_2S , CO_2 , O_2);
- дезактивация - удаление из воды радиоактивных веществ.

Состав основных сооружений водоочистой станции для осветления и обесцвечивания выбирают в зависимости от мутности и цветности исходной воды, а также производительности станции. Наиболее часто применяются технологические схемы, представленные на рисунках 3.1 а-г.

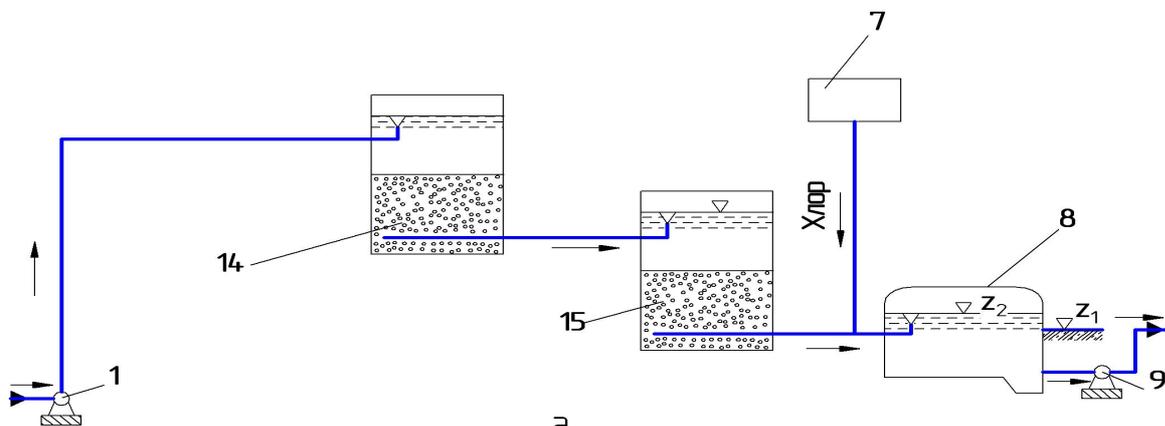




а.



б.



в.

1 -насосная станция 1-го подъема; 2 —смесители; 3 — реагентный цех; 4 — водоворотная камера хлопьеобразования; 5 — вертикальный отстойник; 6 — скорые фильтры; 7 — хлораторная; 8 — резервуары чистой воды; 9 — насосная станция 2-го подъема; 10 — осветлители со взвешенным осадком; 11 — камера хлопьеобразования; 12 — горизонтальные отстойники; 13 — контактные осветлители; 14 — префильтры; 15 — медленные фильтры.

Рисунок 3.1 - Схемы технологических сооружений водоочистных станций: а — с вертикальными отстойниками и скорыми фильтрами; б — с осветлителями и фильтрами; в — с горизонтальными отстойниками и фильтрами; г - с контактными осветлителями; д - с префильтрами и медленными фильтрами.

При рассмотрении качественных характеристик вод следует разделить их на классы и подклассы в соответствии с предложенным классификатором (таблицы 3.1 - 3.2), а затем выбрать технологию подготовки воды с учетом факторов надежности и санитарно-эпидемиологической безопасности.

Таблица 3.1 - Классы поверхностных вод по определяющим природным ингредиентам

Класс вод	Наименование класса вод	Ориентировочные концентрации определяющих ингредиентов	Временный фактор присутствия ингредиентов в воде
A_1	Цветные маломутные воды	$\text{Ц} = 20 - 200^\circ$, $\text{М} < 20 \text{ мг/л}$ $\text{T} = 0 - 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 6,8 - 9$, $\text{ПО} \approx 6 - 10 \text{ мг O}_2/\text{л}$	t_2
A_2	Высокоцветные маломутные воды	$\text{Ц} = 200 - 650^\circ$, $\text{М} = 5 - 50 \text{ мг/л}$, $\text{T} = 0 - 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 6 - 8$ $\text{ПО} \approx 8 - 25 \text{ мг O}_2/\text{л}$	t_1
A_3	Цветные маломутные воды с повышенной окисляемостью	A_1 кроме ПО $\text{ПО} \approx 10 - 25 \text{ мг O}_2/\text{л}$	t_2
B_1	Воды со средним значением цветности и мутности	$\text{Ц} = 25 - 150^\circ$, $\text{М} = 20 - 150 \text{ мг/л}$, $\text{T} = 0 - 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $\text{pH} = 6 - 8$ $\text{ПО} \approx 6 - 10 \text{ мг O}_2/\text{л}$	t_2
B_2	Маломутные воды со средними значениями цветности	B_1 кроме М $\text{М} = 5 - 50 \text{ мг/л}$	t_2

Класс вод	Наименование класса вод	Ориентировочные концентрации определяющих ингредиентов	Временный фактор присутствия ингредиентов в воде
<i>B₃</i>	Воды со средним значением цветности и мутности, содержащие в большом количестве фитопланктон и зоопланктон	<i>B₂</i> дополнительно $\Phi = 10^3 - 10^6$ кл/мл	<i>t₂</i>
<i>C₁</i>	Мутные, малоцветные воды	$\text{Ц} \leq 20^\circ$, $M = 250 - 1000$ мг/л, $T = 0 - 25$ °С, рН = 7 - 9 $\text{ПО} \approx 5 - 8$ мг O ₂ /л	<i>t₂</i>
<i>C₂</i>	Высокомутные воды с преобладанием минеральных загрязнений	$M = 1000 - 5000$ мг/л, $T = 0 - 35$ °С, рН = 7 - 9 $\text{ПО} \approx 3 - 8$ мг O ₂ /л	<i>t₁</i>
<i>C₃</i>	Высокомутные воды с повышенной окисляемостью	<i>C₂</i> кроме ПО $\text{ПО} \approx 8 - 18$ мг O ₂ /л	<i>t₁</i>
<i>D₁</i>	Воды, содержащие в большом количестве фитопланктон и зоопланктон (дрейсена)	$\text{Ц} \leq 200^\circ$, $M \leq 5 - 50$ мг/л, $\Phi = 10^3 - 10^6$ кл/мл, $T = 0 - 30$ °С, рН = 6,5 - 9 $\text{ПО} \approx 5 - 8$ мг O ₂ /л	<i>t₁</i>
<i>D₂</i>	Воды, содержащие в большом количестве фитопланктон и	<i>D₁</i> кроме ПО $\text{ПО} \approx 8 - 25$ мг O ₂ /л	<i>t₁</i>

Класс вод	Наименование класса вод	Ориентировочные концентрации определяющих ингредиентов	Временный фактор присутствия ингредиентов в воде
<i>E</i>	зоопланктон с повышенным содержанием органического вещества Жесткие минерализованные воды	$C > 1000$ мг/л, $Ж_0 > 7$ мг-экв/л, $M \leq 1000$ мг/л, $Ц \leq 20 - 150^\circ$	t_2
<p>Условные обозначения: Ц - цветность, М - мутность, Т - температура; рН - водородный показатель, ПО - перманганатная окисляемость, С - общая минерализация, Ф - количество клеток фитопланктона, Ж₀ - жесткость общая, t_1 - период появления ~ до 3 месяцев в году, t_2 - постоянное присутствие в течение года.</p>			

Таблица 3.2 - Подклассы поверхностных вод по определяющим антропогенным ингредиентам

Подкласс вод	Ингредиенты антропогенного происхождения	Ориентировочные концентрации определяющих ингредиентов	Нормативы СанПиН (ВОЗ) <u>СанПиН 2.1.4.1074</u>	Временной фактор присутствия ингредиентов в воде
1	Нефтепродукты	0,1 - 0,5	0,1 (0,3)	t_1
2	Фенолы	0,001 - 0,01	0,001	t_1
3	ПАВ анионоактивные	0,5 - 2,5	0,5 (-)	t_1
4	Азот аммонийный	2 – 10	2,0 (не уст.)	t_1

Подкласс вод	Ингредиенты антропогенного происхождения	Ориентировочные концентрации определяющих ингредиентов	Нормативы СанПиН (ВОЗ) <u>СанПиН 2.1.4.1074</u>	Временной фактор присутствия ингредиентов в воде
	Нитраты	45 – 90	45,0 (не уст.)	t_1
	Нитриты	3 – 6	3,0 (не уст.)	t_1
5	Пестициды:			
	Линдан	0,002 - 0,02	0,002 (0,003)	t_1
	гептахлор	0,05 - 0,30	0,05 (0,1)	
	ДДТ	0,002 - 0,02	0,002	
6	Соли тяжелых металлов:			
	Ртуть	0,0005 - 0,001	0,0005 (0,001)	
	Свинец	0,03 - 0,1	0,03 (0,03)	
	Хром	0,05 - 0,25	0,05 (0,05)	$t_1 t_2$
	Медь	1,0 - 5,0	1,0 (1,0)	
	Цинк	5,0 - 20,0	5,0 (5,0)	
	Железо	0,3 - 1,5	0,3 (0,3)	
	Кадмий	0,001 - 0,005	(0,001)	
7	Хлорорганические соединения:			
	четыреххлористый углерод	0,006 - 0,01	0,006 (0,003)	$t_1 t_2$
	хлороформ	0,2 - 0,5	0,2 (0,2)	
8	Радиационные загрязнители, Бк/л:			
	общая α -радиация	0,1 - 0,4	0,1	t_2

Подкласс вод	Ингредиенты антропогенного происхождения	Ориентировочные концентрации определяющих ингредиентов	Нормативы СанПиН (ВОЗ) <u>СанПиН</u> <u>2.1.4.1074</u>	Временной фактор присутствия ингредиентов в воде
	общая β -радиация	1,0 - 3,0	1,0	
Примечание - t_1 - период появления ~ до 3 мес. в году, t_2 - постоянное присутствие в течение года.				

Для удобства практического использования классификаторов все основные методы закодированы с использованием условных обозначений. В табл. 2.3 приведены основные технологические методы для очистки воды поверхностных источников.

Таблица 3.3 - Основные технологические методы, применяемые при очистке поверхностных природных вод

Методы водоподготовки	Удаляемые примеси, форма воздействия на них и условия применения	Условные обозначения метода
1 Безреагентные методы обработки		
Удаление грубодисперсных примесей в центробежном поле	Грубо- и тонкодисперсные примеси с плотностью частиц больше 1000 кг/м^3	ГЦ
Отстаивание в открытых отстойниках, в том числе с тонкослойными модулями и слоем взвешенного осадка	ГДП с концентрацией взвеси более $2000 - 5000 \text{ мг/л}$	От
Фильтрация через сетчатые перегородки	ГДП с размером частиц более $20 - 40 \text{ мкм}$, $\Phi > 1000 \text{ кл/л}$	СтФ
Фильтрация через обсыпку фильтрующих оголовков	ГДП, плавающие вещества, щепка, листья, остатки растений водотоков и водоемов	ОбФ
Фильтрация через крупнозернистую среду в	ГДП с размером частиц менее $1,0 \text{ мм}$	КПФ

Методы водоподготовки	Удаляемые примеси, форма воздействия на них и условия применения	Условные обозначения метода
префильтрах Медленное фильтрование	ГДП, коллоидные взвеси и бактерии, $M < 50$ мг/л	МФ
Биологическая предочистка в русле водотоков или во входных биореакторах с использованием прикрепленной микрофлоры	Органические и минеральные примеси, при $ПО > 5$ мг O_2 /л, $T > 5$ °С, $\Phi > 500$ кл/л	БПБ
Аэрирование воды	Газообразные и летучие органические соединения, взвесь с плотностью меньше 1000 кг/м ³ , низкое содержание кислорода, наличие нефтепродуктов	А
Флотация без применения коагулянтов	Органические вещества при $ПО > 6 - 8$ мг O_2 /л и содержании нефтепродуктов $> 1 - 2$ мг/л; интенсификация процессов коагулирования	ФпБ
II Реагентные методы обработки		
Обработка воды коагулянтами и флокулянтами	Тонкодисперсные и коллоидные взвеси, агрегативно и кинетически устойчивые, требующие агрегации и придания им когезионных и адгезионных свойств: снижения электрокинетических сил отталкивания	К(Ф)
Хлопьеобразование скоагулированных частиц в свободном или стесненном объеме	Укрупнение и образование агломератов скоагулированных коллоидов и тонкодисперсной ($d < 0,1$ мкм) взвеси минерального и органического происхождения	ХЛО

Методы водоподготовки	Удаляемые примеси, форма воздействия на них и условия применения	Условные обозначения метода
Обработка хлором (гипохлоритом натрия, кальция)	Органические вещества, обуславливающие цветность воды, трудноокисляемая органика (ПО < 15 мг О ₂ /л) и наличие отдельных ингредиентов (железа, марганца, сероводорода), болезнетворные бактерии и другие микроорганизмы	ХЛ
Обработка воды озоном	Маломутные воды; трудноокисляемые органические вещества, обуславливающие цветность, запах и привкус; болезнетворные бактерии и другие виды микроорганизмов	ОЗ
Обработка воды УФ-облучением	Воды малоцветные и маломутные, болезнетворные микроорганизмы и вирусы	УФ-об
Флотация с применением реагентов	Органические вещества, обуславливающие цветность, ПО < 15 мг О ₂ /л; нефтепродукты и масла 2 - 15 мг/л	ФЛР
Реагентное отстаивание	Органические, минеральные примеси, (М < 25,00 мг/л, Ц < 250°)	ОтР
Реагентное осветление в слое взвешенного осадка с рециркуляцией	То же	ОВОР
Реагентное скорое фильтрование	Коагулированная взвесь с размером частиц меньше 1000 мкм после предочистки М < 200 мг/л, Ц < 200°	СкФР

Методы водоподготовки	Удаляемые примеси, форма воздействия на них и условия применения	Условные обозначения метода
Сорбционная доочистка в стационарном слое адсорбента	Ароматические органические вещества, нефтепродукты меньше 1 мг/л, азот аммонийный, фенолы, пестициды, ПАВ, диоксины, хлорорганические соединения; $M < 10$ мг/л, $Ц < 20^\circ$	СрГУ
Сорбция с вводом мелкогранульных или порошковых сорбентов в очищаемую воду	Неприятные привкусы и запахи; азот аммонийный, нефтепродукты, ПАВ, пестициды	СрПУ
Реагентное умягчение	$Ж_0 < 30$ мг-экв/л; $M < 50$ мг/л	УмР
Стабилизационная, реагентная обработка	При индексе Ланжелъе $I_L >$ и < 0 ; при показателе стабильности $Пс > 1$; при показателе коррозионной активности $Пк > 0,35$ (при $t = 8 - 25$ °С)	СтР
Стабилизационная фильтрационная обработка воды	То же, что и в стабилизационной, реагентной обработке; условия применения уточняются технико-экономическими расчетами	СтФ
Обессоливание реагентное	$C < 3 - 5$ г/л; $Ж_0 < 15$ мг-экв/л.; $M < 150$ мг/л; $Ц < 150^\circ$	ОсР
Обессоливание на ионообменных фильтрах	$C < 2 - 3$ г/л; $Ж_0 < 10 - 15$ мг-экв/л; $M < 1,5 - 5$ мг/л; $Ц < 20^\circ$	ИО
Обессоливание и умягчение обратным осмосом	$C < 35$ мг-экв/л, $Ц < 20^\circ$, $M < 10$ мг/л	ОО
Снижение солесодержания электродиализом	$C < 10$ мг-экв/л; $M < 1,5$ мг/л; $Ц < 20^\circ$, содержание железа до 0,3 мг/л	Эд

Таблица 3.4 - Классификатор технологий очистки поверхностных вод.
Основные технологии

Класс вод	Группа примесей	Временной фактор	Рекомендуемые технологические схемы	Код технологий
A_1	II	t_2	ХЛ → К(Ф) → ХЛО → ОтР → СкФР → ХЛ	T1
A_2	II	t_2	ОЗ ₁ → К(Ф) → ФЛР → СкФР → ОЗ ₂ → СрГУ → ХЛ	T2
	II, III	t_1	БПБ → К(Ф) → СкФР ₁ → ОЗ → СрПУ → СкФР ₂ → ХЛ	T3
	II, III	t_2	БПБ → К(Ф) → СкФР → ОЗ → СрГУ → ХЛ	T4
A_2	II, III	t_2	БПБ → ОЗ ₁ → К(Ф) → ХЛО → РО → СкФР → ОЗ ₂ → СрГУ → ХЛ	T1
	II, III	t_2	ОЗ ₁ → К(Ф) → ХЛО → ОтР → СкФР ₁ → ОЗ ₂ → СрПУ → СкФР ₂ → ХЛ	T2
B_1	I, II	t_2	ХЛ → К(Ф) → СкФР ₁ → СрПУ → СкФР ₂ → ХЛ	T1
B_2	I, II	t_2	БПБ → К(Ф) → СкФР → ОЗ → СрГУ → ХЛ	T2
C_1	I	t_2	ОбФ(ГЦ) → БПБ → К(Ф) → ОВОР → СкФР → ХЛ	T1
	I, II	t_2	ОбФ(ГЦ) → БПБ → К(Ф) → ХЛО → ОтР → СкФР → ОЗ → СрГУ → ХЛ	T2
	I, II, III	t_1	От → БПБ → К(Ф) → СкФР ₁ → СрПУ → СкФР ₂ → ХЛ	T3
C_2	I, II	t_2	От → БПБ → К(Ф) → ОВОР → СкФР → ХЛ	T1
	I, II	t_2	От → БПБ → К(Ф) → ХЛО → ОР → СкФР → ОЗ → СрГУ → ХЛ	T2

Класс вод	Группа примесей	Временной фактор	Рекомендуемые технологические схемы	Код технологий
C_3	I, II	t_1	От → ОбФ → К(Ф) → КПФ → ОЗ → СрПУ → СкФР → ХЛ	T3
D_1	I, II	t_2	СтФ(МФ) → БПБ → К(Ф) → СкФР ₁ → ОЗ → СрГУ → ХЛ	T1
	I, III	t_2	СтФ(МФ) → БПБ → К(Ф) → СкФР ₁ → ОЗ → СрПУ → СкФР ₂ → ХЛ	T2
D_2	I, II, III	t_1	Фл → БПБ → К(Ф) → Хл → От → СрПУ → СкФР → ХЛ	T3
E	IV	t_2	Об → К(Ф,Щ) → ОВОР → СкФР → ХЛ	T1
	IV	t_1	От → БПБ → К(Ф) → ОВОР → СкФР ₁ → СрПУ → СкФР ₂ → ХЛ	T2
	IV	t_2	ОбФ → К(Ф) → ОВОР → СкФР → ОЗ → СрГУ → ХЛ	T3
	IV	t_1	ОбФ → К(Ф) → СкФР → ОО(ЭД) → СрГУ → ХЛ	T4

Примечания

1 Технологические схемы уточняются после изысканий в местах водозаборов и технико-экономических расчетов, выполненных с учетом местных условий строительства, расстояния до баз индустрии фильтрующих материалов, реагентов и пр.

2 Все материалы, реагенты и оборудование должны иметь гигиеническое заключение на применение в питьевом водоснабжении.

Таблица 3.5 – Классификатор технологий очистки поверхностных вод с учетом антропогенных загрязнений

Класс	Подкласс вод							
	1	2	3	4	5	6	7	8
A ₁	T3	T2	T2	T3	T4	T1(К(Ф))	T2(СрПУ)	T1(К(Ф),СрПУ)
A ₂	T2	T1	T1	T1	T2	T1(К(Ф))	T2(СрПУ)	T2(К(Ф))
B	T1	T2	T2	T2	T2	T1	T2(СрПУ)	T1(СрПУ)
C ₁	T2	T2	T2	T2	T2	T1(К(Ф))	T2(СрПУ)	T1(К(Ф),СрГУ)
C ₂	T1	T2	T2	T2	T2	T2	T3	T1(ПУ,СрГУ)
D	T2	T2	T2	T3	T2	T1(К(Ф))	T3(СрГУ)	T3(К(Ф),СрГУ)
E	T2	T3	T3	T3	T2	T2	T3(СрПУ)	T1(К(Ф),СрГУ)

Примечания

Технологические параметры методов водообработки, типы реагентов, инертных фильтрующих материалов и сорбентов, дозы коагулянтов и флокулянтов уточняются в процессе технологических изысканий для конкретного водисточника и места водозабора.

Номер технологической схемы соответствует номеру, относящемуся к конкретному классу вод.

Рассмотрим подробнее некоторые наиболее часто применяемые методы и технологические процессы обработки воды.

4 Коагулирование примесей воды и сооружения для коагуляции

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

Коагуляция примесей воды – это процесс укрупнения мельчайших коллоидных и диспергированных частиц, происходящий вследствие их взаимного слипания под действием сил молекулярного притяжения. Коагуляция завершается образованием видимых невооруженным глазом агрегатов (хлопьев) и отделением их от жидкой среды. Различают два типа коагуляции: коагуляция в свободном объеме (в камерах хлопьеобразования) и контактная коагуляция (в толще зернистой загрузки или в массе взвешенного осадка).

Коагуляция может происходить самопроизвольно или под влиянием химических и физических факторов. В процессах очистки воды коагуляция происходит под влиянием добавляемых к ним специальных веществ-коагулянтов. Коагулянты в воде образуют хлопья гидроксидов металлов, которые быстро оседают под действием силы тяжести. Хлопья обладают способностью улавливать коллоидные и взвешенные частицы и агрегировать их. Обусловлено это тем, что коллоидные частицы имеют слабый отрицательный заряд, а хлопья коагулянтов - слабый положительный заряд; поэтому между ними возникает взаимное притяжение.

Обладая большой удельной поверхностью, коллоидные и мелкодисперсные частицы адсорбируют находящиеся в воде ионы. Вокруг них образуется двойной электрический слой ионов с отрицательным электрокинетическим потенциалом, называемым в практике очистки воды дзета-потенциалом (ζ - потенциалом).

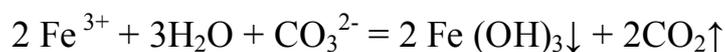
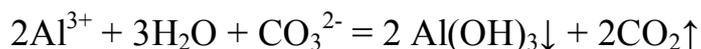
Отрицательный заряд, распределенный по поверхности коллоидных частиц, приводит к возникновению между ними электростатических сил отталкивания, которые предохраняют частицы от слипания друг с другом. Это, а также малый размер частиц, обуславливает высокую стабильность коллоидной системы.

Чтобы вызвать коагуляцию коллоидных частиц, необходимо снизить величину их ζ - потенциала до критического значения добавлением ионов, имеющих положительный заряд.

Таким образом, при коагуляции происходит дестабилизация коллоидных частиц вследствие нейтрализации их электрического заряда. Эффект коагуляции зависит от валентности иона коагулянта, несущего заряд, противоположный знаку заряда частицы. Чем выше валентность, тем более эффективно коагулирующее действие.

В качестве коагулянтов обычно используют соли трехвалентных металлов: алюминия, железа или их смеси. Наиболее распространены $Al_2(SO_4)_3$ – сульфат алюминия, $Fe_2(SO_4)_3$ - сульфат железа и $FeCl_3$ — хлорид железа.

Поскольку природные воды обычно имеют некоторый запас щелочности, то введенный катион алюминия (или железа) взаимодействует с карбонат- и гидрокарбонат-ионами с образованием малорастворимого гидроксида алюминия (или железа):



При недостатке щелочного резерва к воде добавляют известь или соду (подщелачивание). Оптимально подщелачивание производить известью, так как не образуется углекислота и получается наиболее высокое значение pH воды. Процесс коагулирования примесей воды можно улучшить путем удаления углекислоты из зоны реакции продувкой воздухом.

Гидроксиды железа и алюминия в воде почти нерастворимы. Хлопья частиц гидроксида оседают (осаждаются) и увлекают с собой, адсорбируя, нерастворимые частицы взвеси (ила, клеток планктона, крупных микроорганизмов, остатков растений и т.д.). Гидроксиды железа и алюминия – хорошие сорбенты. Они сорбируют на поверхности своих частиц бактерии, гуминовые вещества и некоторые растворенные соединения, например ионы тяжелых металлов.

При использовании смеси $Al_2(SO_4)_3$ и $FeCl_3$ в соотношении от 1:1 до 1:2 достигается лучший результат коагулирования, чем при отдельном использовании реагентов. Происходит ускорение осаждения хлопьев. Кроме

названных коагулянтов, для обработки природных вод могут быть использованы алюминат натрия NaAlO_2 , гидроксохлорид алюминия $\text{Al}_2(\text{OH})_5\text{Cl}$, алюмокалиевые квасцы $\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ и аммиачные квасцы $\text{NH}_4\text{Al}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$, а также некоторые другие алюминийсодержащие вещества.

Оптимальная доза коагулянта устанавливается на основании пробного коагулирования.

Флокуляцией называется процесс агрегации взвешенных частиц при добавлении в воду высокомолекулярных полимерных соединений, называемых флокулянтами. В отличие от коагуляции, при флокуляции агрегация происходит не при непосредственном контакте частиц, а в результате взаимодействия молекул адсорбированного на частицах флокулянта.

Механизм действия флокулянтов основан на следующих явлениях: адсорбции молекул флокулянта на поверхности коллоидных частиц; образовании полимерных мостиков между молекулами флокулянта, сорбированными на соседних частицах (происходит ретикуляция — образование сетчатой трехмерной структуры молекул флокулянта) с дальнейшим слипанием коллоидных частиц под действием сил Ван-дер-Ваальса.

Обычно флокулянты применяют в дополнение к минеральным коагулянтам для ускорения процесса хлопьеобразования, увеличения скорости осаждения хлопьев, для повышения качества очищенной воды; а в ряде случаев — и вместо коагулянтов, так как флокулянты также вызывают коагуляцию коллоидных примесей, только по иному механизму.

Использование флокулянтов позволяет снизить дозы коагулянтов, повышает плотность и прочность образующихся агрегатов, стабилизирует работу сооружений водоподготовки, повышает их производительность.

Используемые для очистки воды флокулянты можно подразделить на три группы:

- 1) неорганические;
- 2) природные органические;
- 3) синтетические органические.

Наиболее распространенным неорганическим флокулянтом является активный диоксид кремния ($x\text{SiO}_2 \cdot y\text{H}_2\text{O}$). При его добавлении в воду в количестве 2-3 г/м³ скорость осаждения хлопьев увеличивается в 2-3 раза, существенно повышается эффект осветления.

К природным органическим флокулянтам относятся крахмал, декстрин, эфиры, целлюлозы и другие. Из синтетических органических флокулянтов наибольшее применение в нашей стране получил полиакриламид (ПАА). Оптимальная доза ПАА для очистки природных вод колеблется в пределах от 0,4 до 1 г/м³. Полиакриламид выпускается в виде 7-9%-ного геля, затвердевающего при $t < 0^{\circ}\text{C}$.

Эффективность любого флокулянта рассчитывают по формуле

$$\eta_{\phi} = \frac{w_{\text{сф}} - w}{w \cdot q},$$

где $w_{\text{сф}}$ и w — скорость осаждения сфлокулированного и несфлокулированного шлама соответственно, м/с; q — расход флокулянта на 1 т твердого вещества, г.

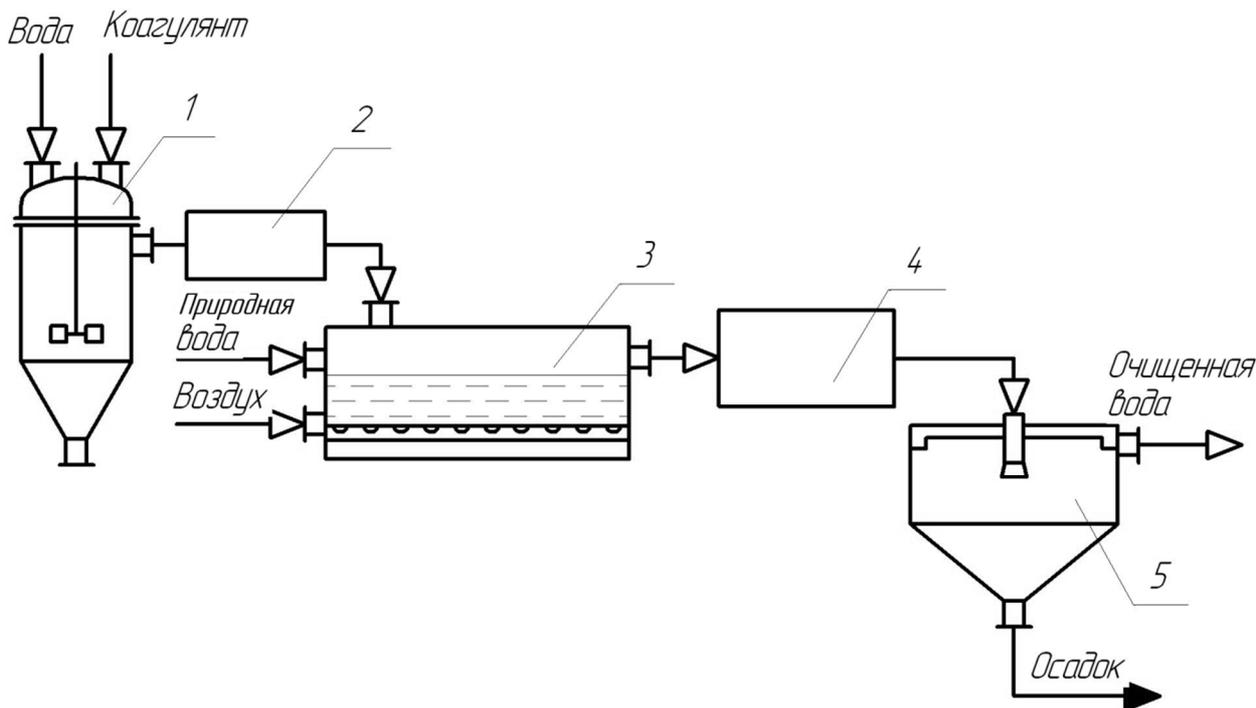
4.1 Технологическая схема процесса очистки воды коагуляцией

Процесс очистки природных вод коагуляцией и флокуляцией состоит из следующих стадий: приготовление растворов коагулянтов и флокулянтов в воде, дозирование их в природную воду, смешение реагентов с осветляемой водой, хлопьеобразование и осаждение хлопьев.

Коагулянты приготавливают в виде растворов или суспензий. Растворение коагулянтов осуществляют в баках, которых обычно бывает не менее двух (пока в одном из них растворяют коагулянт, из другого бака его уже дозируют в воду). Концентрация раствора коагулянта в расходных баках должна составлять 10-17%. Обычно продолжительность растворения при температуре воды 10^oC принимают равной 10-12 часам.

Перемешивание в расходных баках производится лопастными мешалками, сжатым воздухом или циркуляционными насосами. Подача растворов или суспензий коагулянтов в воду осуществляется с помощью насосов-дозаторов.

Для смешения коагулянтов с водой применяют гидравлические, пневматические и механические смесители. В гидравлических смесителях смешение происходит вследствие изменения направления движения и скорости потока воды.



1 – емкость для приготовления растворов; 2 – насос-дозатор; 3 – смеситель; 4 – камера хлопьеобразования; 5 – отстойник.

Рисунок 4.1 – Схема установки для очистки воды коагуляцией

В механических смесителях - аппаратах с мешалкой процесс перемешивания должен быть равномерным и медленным, чтобы частицы при сближении образовывали хлопья, которые не разрушались бы при вращении мешалки.

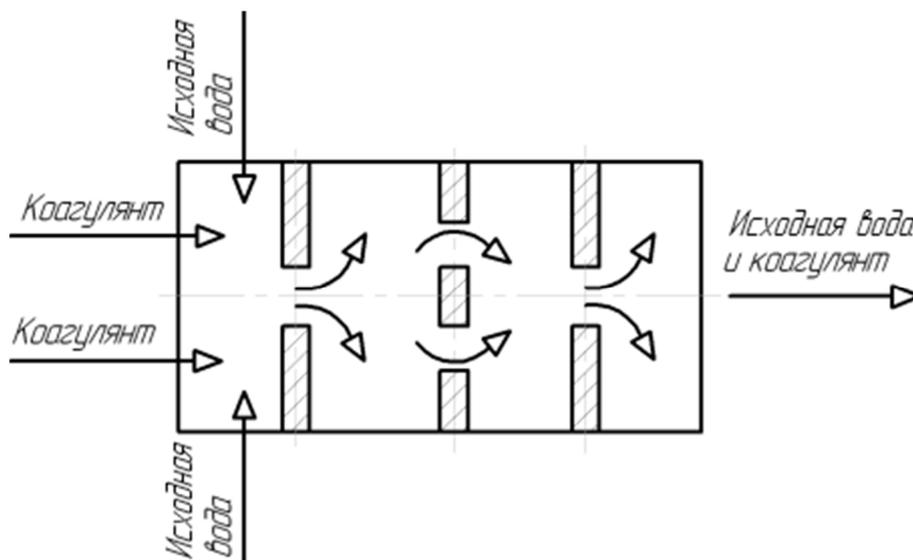


Рисунок 4.2 – Схема гидравлического смесителя

После смешения воды с реагентами их направляют в камеры хлопьеобразования. Образование хлопьев протекает медленно - за 10-30 минут. Камеры нужны для образования крупных, прочных, быстрооседающих хлопьев гидроксидов металлов с захваченными ими примесями. Обычно используют перегородчатые камеры, реже камеры с механическими мешалками. Перегородчатая камера (рисунок 4.3) представляет собой резервуар, разделенный перегородками на ряд последовательно проходимых водой коридоров. Скорость воды в коридорах принимают равной 0,2-0,3 м/с.

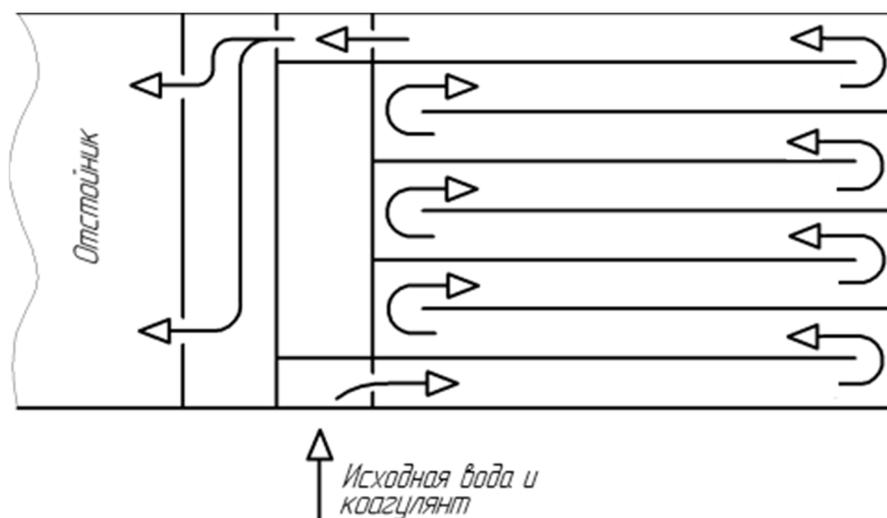


Рисунок 4.3 – Схема камеры хлопьеобразования

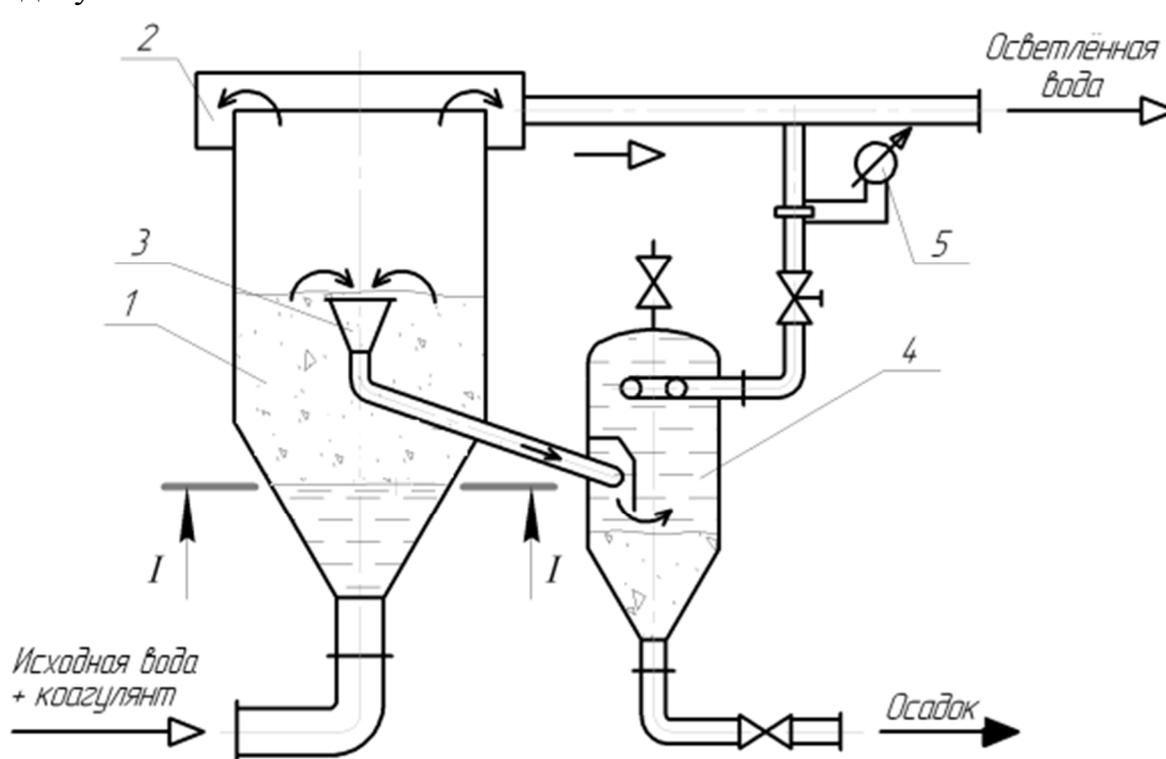
Чтобы предотвратить разрушение образовавшихся хлопьев гидроксидов металлов при переходе суспензии из камер хлопьеобразования в отстойники, камеры обычно изготавливают примыкающими к отстойникам или встроенными в них так, чтобы камеры хлопьеобразования и отстойники представляли собой единое сооружение.

Однако использование камер хлопьеобразования целесообразно лишь в том случае, когда для последующего осветления воды применяют обычные емкостные отстойники. Если отстаивание проводится в осветлителях со взвешенным слоем осадка, то камеры хлопьеобразования не требуются, так как хлопья достаточно эффективно образуются во взвешенном слое осадка.

Осветлители-коагуляторы с взвешенным слоем осадка применяют при повышенном содержании в природных водах трудно оседающих веществ. В них совмещаются процессы коагуляции (хлопьеобразования), осаждения и фильтрации воды через слой взвешенного осадка. Эффективность очистки в

осветлителях-коагуляторах выше, чем в обычном отстойнике, и может достигать 70-75%.

Рассмотрим схему осветлителя-коагулятора с выносным осадкоуплотнителем.



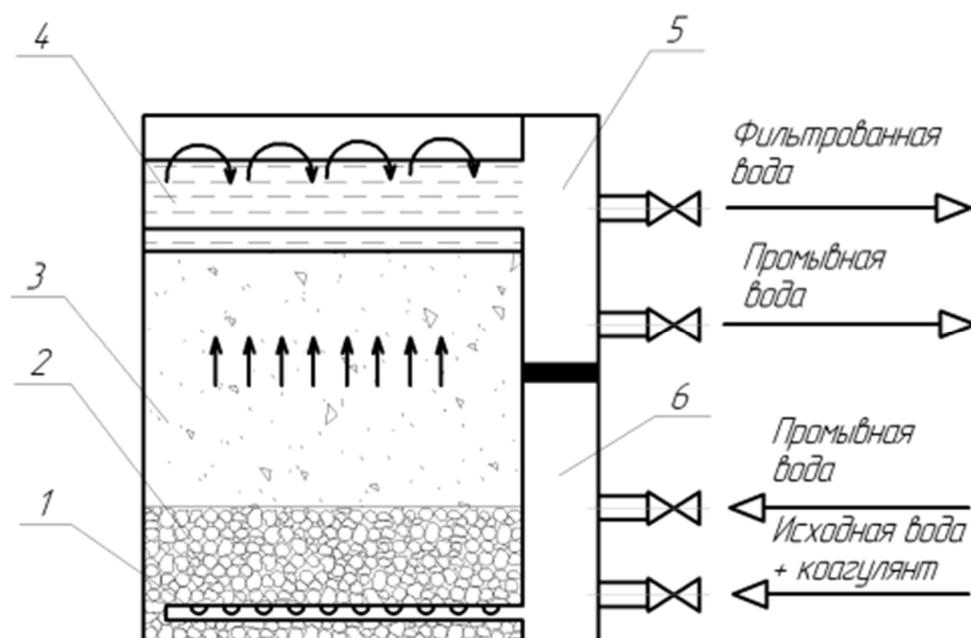
1 – осветлитель; 2 – круговой желоб; 3 – центральная труба для отвода осадка; 4 – осадкоуплотнитель; 5 – расходомер.

Рисунок 4.4 – Осветлитель-коагулятор с взвешенным слоем осадка и выносным осадкоуплотнителем

Природная вода с взвесями поступает в нижнюю часть осветлителя после смешения с коагулянтами. Хлопья коагулянта и увлекаемые ими частицы взвеси поднимаются восходящим потоком воды до тех пор, пока скорость их выпадения не станет равной скорости восходящего потока (сечение I - I). Выше этого сечения образуется слой взвешенного осадка, через который фильтруется осветляемая вода. При этом наблюдается процесс прилипания частиц взвеси к хлопьям коагулянта. Осветленная вода поступает в круговой желоб 2, из которого отводится на доочистку. Образующийся избыточный осадок по центральной трубе 3 непрерывно перетекает в осадкоуплотнитель 4. Уплотненный осадок отводится снизу, а вода — сверху.

4.2 Обработка воды коагуляцией в контактных осветителях

Контактные осветители (рисунок 4.5) представляют собой разновидность зернистых фильтров, работающую по принципу фильтрования воды снизу вверх в направлении убывающей крупности зерен через слой загрузки большой толщины. При очистке воды на контактных осветителях коагулянт вводят в воду непосредственно перед её поступлением в загрузку осветителей. Процесс коагуляции происходит в толще зернистого слоя. Агломерация примесей происходит не в свободном объеме воды, а на зернах загрузки контактных осветителей. Такой процесс называется *контактной коагуляцией*, что обуславливается контактом воды, содержащей коагулированные примеси, с поверхностью зерен контактной массы.



1 – дренаж; 2 – слой гравия; 3 – песчаная фильтрующая загрузка; 4 – лоток (желоб); 5 – карман боковой; 6 – нижнее отделение бокового кармана.

Рисунок 4.5 – Контактный осветитель-коагулятор

Процесс контактной коагуляции идет с большей полнотой и во много раз быстрее, чем при обычной коагуляции в объеме. Доза коагулянта для контактной коагуляции, как правило, меньше, чем доза, необходимая для коагулирования примесей в свободном объеме. Процесс протекает с получением тяжелых, хорошо оседающих хлопьев. Однако решающее значение здесь имеет быстрота предшествующего смешения природной воды

с коагулянтом и равномерность его распределения в обрабатываемой воде.

4.3 Электрокоагуляция

Процесс очистки природных вод от коллоидных и мелкодисперсных примесей коагуляцией можно осуществлять без добавления реагентов, пропуская исходную воду через электролизер с анодами из алюминия или железа. Под действием постоянного электрического тока происходит растворение металла, в результате чего в воду переходят катионы железа или алюминия, которые встречаясь с гидроксидными группами (ОНГ), образуют гидроксиды металлов в виде хлопьев. Наступает интенсивная коагуляция. Ей способствует наличие электрического поля, а также электрохимические реакции в межэлектродном пространстве, приводящие к снижению устойчивости дисперсной системы.

В процессе электрохимической коагуляции наблюдается также снижение содержания органических примесей сточных вод, вследствие протекания окислительных и других реакций.

Положительные результаты получены при электрохимическом коагулировании природных вод, содержащих эмульгированные частицы нефтепродуктов, жиров, а также хроматы, фосфаты.

Рассмотрим электрокоагулятор с вертикально установленными электродами (рисунок 4.6).

Обрабатываемая вода протекает между листами алюминия или железа и отводится с помощью сборных лотков, расположенных в верхней части электролизёра, в отстойник.

Анодное растворение металла целесообразно проводить при невысокой плотности тока (до 10 A/m^2). С уменьшением расстояния между электродами расход электроэнергии на растворение металла снижается. Рекомендуется принимать расстояние между электродами 10-20 мм (не более 20 мм), напряжение 3-4 В постоянного тока. Скорость движения воды между электродами должна быть не менее 0,5 м/с, чтобы избежать осаждения хлопьев на дне коагулятора.

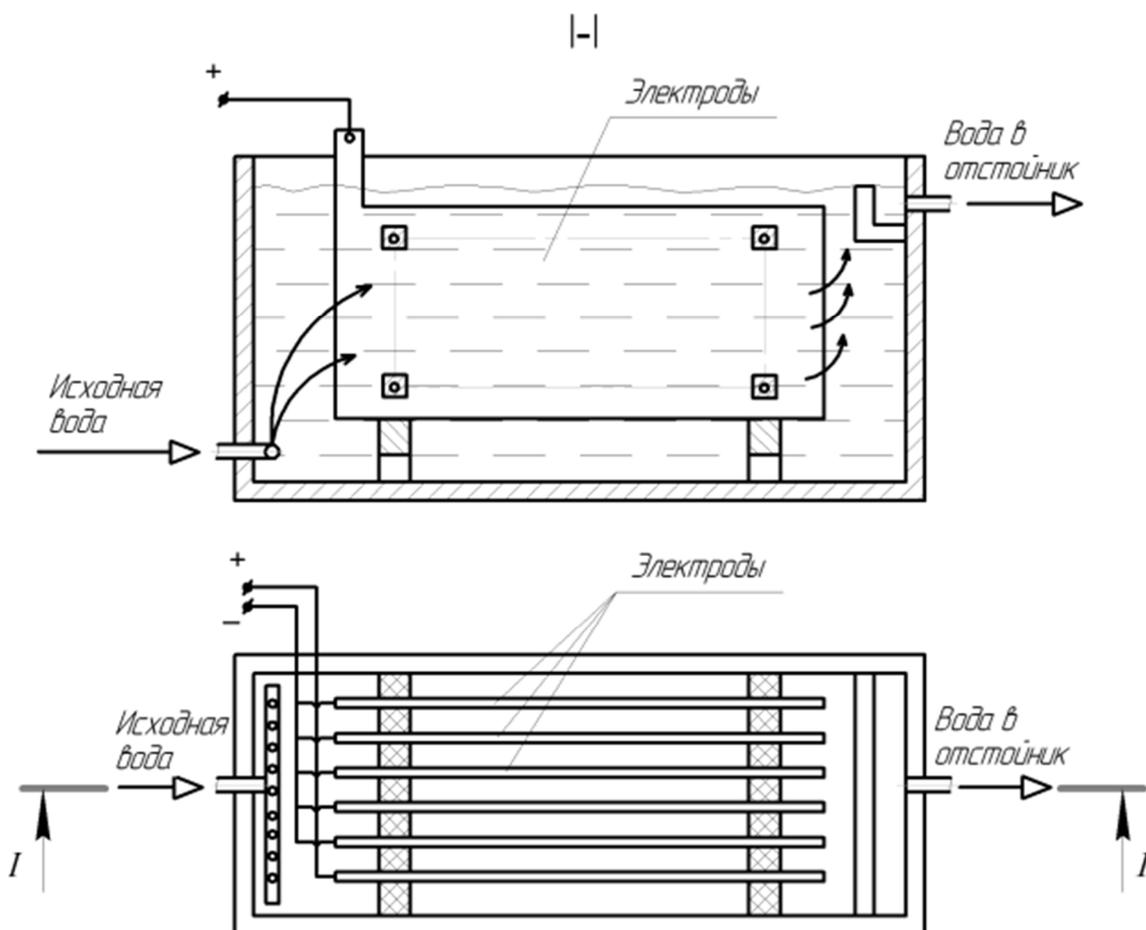


Рисунок 4.6 – Электрокоагулятор с вертикально установленными электродами

Теоретический расход электроэнергии на растворение 1 г железа составляет 2,9 Вт·ч; на растворение 1 г алюминия – 12 Вт·ч.

Растворение в воде 1 г алюминия эквивалентно введению в воду 6,33 г $Al_2(SO_4)_3$, растворение 1 г железа равноценно введению 2,9 г $FeCl_3$ или 3,5 г $Fe_2(SO_4)_3$.

Сравнивая стоимость затрачиваемой электроэнергии со стоимостью необходимого количества реагентов, можно сделать выбор между химической коагуляцией и электрокоагуляцией.

Достоинства метода электрокоагуляции: компактность установок и простота управления, отсутствия потребности в реагентах, малая чувствительность к изменениям условий проведения процесса очистки (температура, рН среды, присутствие токсичных веществ), получение шлама с хорошими структурно-механическими свойствами.

Недостатком метода является повышенный расход металла и электроэнергии.

5 Отстойники

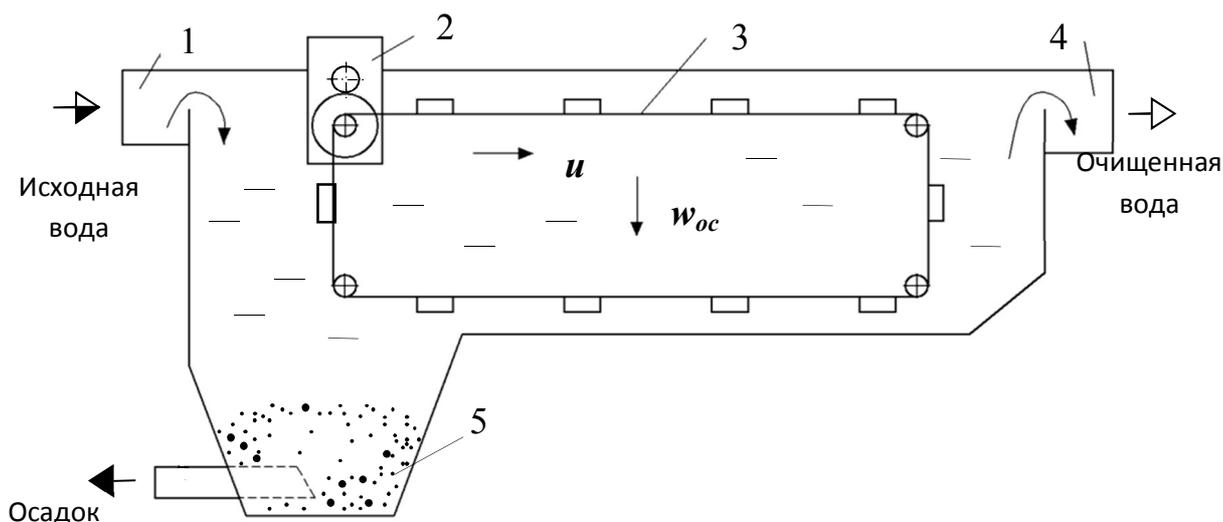
Отстойники обычно используют для выделения из природных вод твердых частиц размером от 20 до 250 мкм.

Отстойник является основным сооружением механической очистки природных вод, используется для удаления оседающих или всплывающих грубодисперсных примесей.

5.1 Отстойники емкостного типа

По направлению движения обрабатываемой воды отстойники делят на горизонтальные, вертикальные, радиальные, комбинированные.

Горизонтальные отстойники применяют при расходах воды до 15000 м³/сут (600 м³/ч). Глубина отстойников H достигает 1,5÷4 м; отношение длины к глубине $L/H = 8÷20$. Ширина отстойника B зависит от способа удаления осадка и обычно находится в пределах от 3 до 9 м (ширина коридора от 3 до 6 м).



1 – водоподводящий лоток; 2 – привод скребкового механизма; 3 – скребковый механизм; 4 – водоотводящий лоток; 5 – приямок для сбора осадка.

Рисунок 5.1 - Горизонтальный отстойник

Отстойники оборудуются скребковыми механизмами тележечного или ленточного типа, сдвигающими выпавший осадок в приямок. Объем приямка равен двухсуточному (не более) количеству выпавшего осадка. Из приямка осадки удаляют насосами, гидроэлеваторами или под действием гидростатического давления. Угол наклона стенок приямка принимают

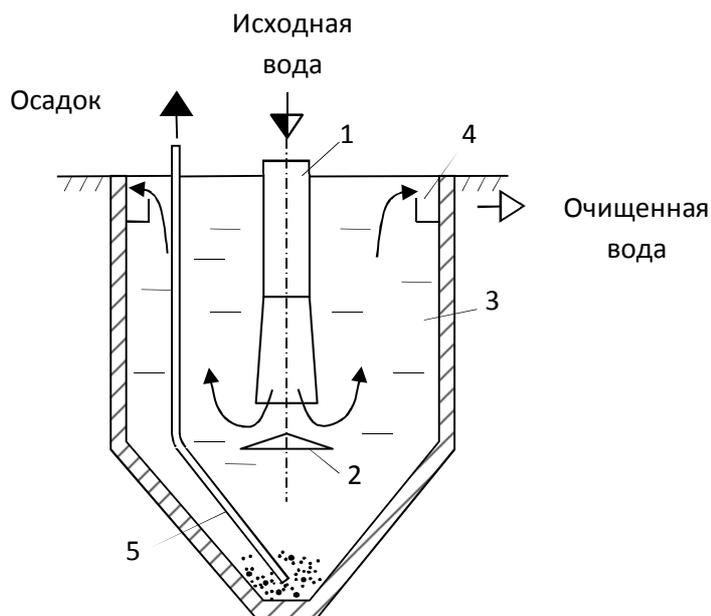
равным 50-60°. Днище отстойника имеет уклон к приемке не менее 0,005. Длину отстойника вычисляют по зависимости

$$L = ku \frac{H}{w_{oc}}, \quad (5.1)$$

где u – скорость движения воды в проточной части отстойника; u принимают в пределах от 0,005 до 0,01 м/с; k - коэффициент, учитывающий влияние неравномерности скорости движения сточной воды в отстойнике; $k = 2$.

Методы расчета и экспериментальной оценки скорости w_{oc} осаждения твердых частиц в жидкости, подробно описаны в пособии [5].

Вертикальные отстойники. Главная особенность вертикальных отстойников - отсутствие механизмов для сбора осадка. Осадок сползает по стенкам круто наклонного днища самостоятельно, под действием силы тяжести. Вертикальные отстойники применяют на сооружениях водоподготовки производительностью до 20000 м³/сут (800 м³/ч). Это круглые в плане резервуары диаметром 4÷9 м с коническим днищем.



1 – центральная труба; 2 – отражательный щит; 3 – отстойная часть; 4 – водослив; 5 – илопровод для удаления осадка.

Рисунок 5.2 – Вертикальный отстойник

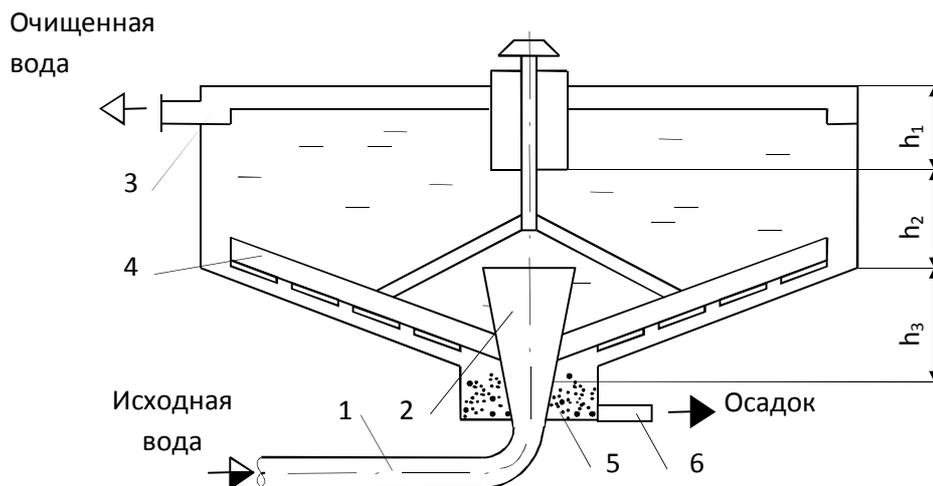
Наиболее распространены отстойники с впуском воды через центральную трубу с раструбом. Скорость движения воды в трубе принимают равной до 0,03 м/с. Расстояние между отражательным щитом и

раструбом выбирают таким, чтобы скорость поступления воды в отстойную зону была не более 0,02 м/с. Рекомендуется диаметр раструба и его высоту принимать равными 1,35 диаметра центральной трубы, а диаметр отражательного щита – 1,3 диаметра раструба ($D_p = H_p = 1,35 d_{тр}$; $D_{щ} = 1,3 D_p$). При заданном расходе очищаемой воды геометрические размеры отстойника выбирают таким образом, чтобы скорость восходящего движения воды в кольцевой зоне не превышала скорость осаждения твердых частиц в воде.

Широкое применение для осветления воды на крупных очистных сооружениях находят *радиальные отстойники*, обладающие высокой производительностью. Их применяют при расходах воды более 20000 м³/сут.

Существует три конструктивных модификации радиальных отстойников:

- с центральным впуском сточной воды;
- с периферийным впуском сточной воды;
- с вращающимися сборно-распределительными устройствами.



- 1 – впускной патрубок; 2 – центральная труба диффузорного сечения; 3 – водоотводящий кольцевой лоток; 4- вращающееся скребковое устройство; 5 – шламосборник; 6 – канал для отвода осадка на дальнейшую обработку.

Рисунок 5.3 – Радиальный отстойник

Подлежащая осветлению вода по впускному патрубку 1 через центральную трубу 2 диффузорного сечения поступает в отстойник и движется в радиальном направлении. Увеличение выходного диаметра центрального раструба обеспечивает при заданном расходе воды уменьшение

скорости ее истечения из трубопровода и, следовательно, увеличение вероятности осаждения твердых частиц в отстойнике в спокойном гидродинамическом режиме (без турбулентных завихрений). Осветленная вода через водоотводящий кольцевой лоток 3 направляется на дальнейшую очистку, а осадок вращающимся скребковым устройством 4 направляется в шламосборник 5 и через канал 6 периодически удаляется из отстойника.

Расчет радиальных отстойников во многом аналогичен расчету горизонтальных конструкций. Диаметр отстойника рассчитывают по скорости осаждения наиболее мелких частиц $w_{oc\ min}$, которые желательно уловить в отстойнике

$$D = \sqrt{\frac{4V_{ж}}{\pi w_{oc\ min}}}, \quad (5.2)$$

Эффективность осаждения взвешенных частиц в отстойниках (эффективность отстаивания) вычисляют по зависимости

$$\eta = \frac{x_n - x_k}{x_n} \cdot 100\%, \quad (5.3)$$

где x_n и x_k – соответственно начальная и конечная концентрация дисперсной фазы, кг/м³.

В большинстве случаев для емкостных отстойников при продолжительности отстаивания 1÷1,5 ч эффективность очистки воды от взвесей составляет всего лишь 40÷60%; эффективность работы отстойников-осветлителей достигает 70% [1].

Скорость осаждения взвешенных частиц в отстойнике можно оценить по формулам, приведенным в [5-7], но так как взвешенные частицы в природной воде, обработанной коагулянтами, в процессе осаждения в большинстве случаев изменяют форму, размеры, плотность и представляют собой агрегативно-неустойчивую полидисперсную систему, то действительную скорость осаждения частиц обычно определяют экспериментально [5].

Для ориентировочной оценки скорости осаждения твердых частиц с размером δ , плотностью ρ_T в воде с плотностью $\rho_{ж}$ и динамической вязкостью $\mu_{ж}$ можно использовать формулу Стокса

$$w_{oc} = \frac{\delta_T^2 (\rho_T - \rho_{ж}) g}{18 \mu_{ж}} \quad (5.4)$$

Требуемая площадь осаждения

$$F_{от} = \frac{V_{ж}}{w_{ос}} = \frac{G_{ж}}{\rho_{ж}w_{ос}} \quad (5.5)$$

где $V_{ж}$ – объемный расход осветленной жидкости, м³/с; $G_{ж}$ – ее массовый расход, кг/с.

Обычно при расчете отстойников известен расход исходной суспензии (сточной воды) V_c , а не расход осветленной жидкости $V_{ж}$.

Массовый расход осветленной жидкости $G_{ж}$ находят из материального баланса отстойника:

$$G_{ж} = G_c - G_{ос}, \quad (5.6)$$

где G_c - массовый расход исходной суспензии, кг/с; $G_{ос}$ - массовый расход удаляемого осадка, кг/с;

$$G_c x_c = G_{ос} x_{ос} + G_{ж} x_{ж}, \quad (5.7)$$

где x_c , $x_{ос}$, $x_{ж}$ – концентрации (массовые доли) твердой фазы в исходной суспензии, осадке и осветленной жидкости соответственно.

Ориентировочный расчет отстойников часто проводят в предположении, что в осветленной жидкости не содержится твердая фаза, т.е. $x_{ж} = 0$.

Тогда

$$G_{ос} = G_c \frac{x_c}{x_{ос}}; \quad (5.8)$$

$$G_{ж} = G_c - G_c \frac{x_c}{x_{ос}} = G_c \left(1 - \frac{x_c}{x_{ос}}\right), \quad (5.9)$$

и площадь отстойника

$$F_{от} = \frac{G_c \left(1 - \frac{x_c}{x_{ос}}\right)}{\rho_{ж}w_{ос}}. \quad (5.10)$$

Высота отстойника непосредственно на его производительность не влияет и выбирается из конструктивных соображений из нормального ряда высот.

Примеры расчета емкостных отстойников приведены в учебном пособии [5].

5.2 Тонкослойные отстойники

Емкостные отстойники трудно назвать интенсивными аппаратами. Процессы разделения фаз в них протекают медленно, отсюда большие габариты и высокая стоимость сооружений.

Поиски методов интенсификации и удешевления процесса отстаивания привели к созданию седиментационных аппаратов, отличающихся от обычных малой глубиной зоны осаждения. В таких отстойниках отстойная зона делится трубчатыми или пластинчатыми элементами на ряд слоев небольшой глубины (от 20 до 100 мм). При малой глубине отстаивание протекает быстро (осветление воды происходит в течение 4÷10 мин). Это позволяет значительно уменьшить размеры отстойников.

По конструкции тонкослойные отстойники подразделяются на трубчатые и пластинчатые (полочные, ламельные, многоярусные).

5.2.1 Трубчатые отстойники

Рабочим элементом трубчатого отстойника является трубка диаметром 25÷100 мм длиной 600÷2000 мм. Возможно применение трубок квадратного, прямоугольного, шестиугольного, ромбовидного сечения. В настоящее время используют две конструкции трубчатых отстойников: с малым наклоном труб и крутонаклонные [5].

Трубчатый отстойник с малым наклоном труб (рисунок 5.4) работает в периодическом режиме, включающем периоды осветления воды и промывки трубок обратным током осветленной воды. Эти отстойники целесообразно применять для осветления вод, содержащих небольшое количество взвешенных веществ, и монтировать в схеме с зернистыми фильтрами. Промывка загрузки фильтра совмещается с промывкой трубок отстойника. Небольшой наклон трубок (5°) в направлении движения промывной воды обеспечивает полноту удаления осадка.

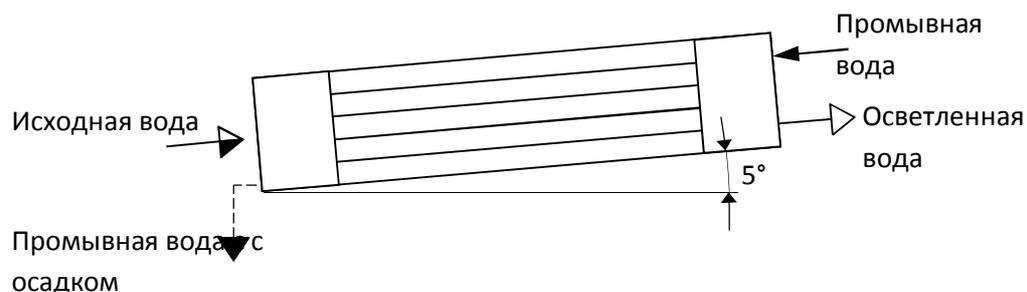


Рисунок 5.4 – Трубчатый тонкослойный отстойник периодического действия (с малым наклоном труб)

Эффективность осветления составляет 80-85%. Такие отстойники рекомендуется использовать при расходах вод 100-10000 м³/сутки. Гидравлические нагрузки на трубчатый отстойник составляют 6÷10 м³/час на 1 м² входного сечения трубок, что в 2÷4 раза превышает нагрузки на обычный емкостной отстойник [8]. Это говорит о том, что при одной и той же производительности трубчатый отстойник гораздо компактнее. Длительность цикла работы отстойника (время от промывки до промывки) практически не зависит от диаметра трубок, но возрастает с увеличением их длины l .

Крутонаклонный трубчатый отстойник – это аппарат непрерывного действия. В этом отстойнике (рисунок 5.5) осветляемая вода проходит через трубки, расположенные под углом 45÷60°, снизу вверх, а осадок сползает по дну трубок вниз и скапливается в шламовом пространстве. Непрерывное удаление осадка исключает необходимость промывки трубок.

Такие отстойники часто изготавливают в виде стандартных блоков из пластмассовых ячеек прямоугольного сечения. Размер трубчатого элемента в поперечном сечении обычно составляет 50 x 50 мм.

5.2.2 Пластинчатые отстойники

Пластинчатые (синонимы: полочные, ламельные, многоярусные) отстойники состоят из ряда параллельно установленных наклонных пластин. Вода в отстойнике движется параллельно пластинам. Взвешенные частицы оседают на пластины и сползают в шламовое пространство.

В зависимости от взаимного движения осветляемой воды и выпавшего осадка пластинчатые отстойники делят [5,8] на

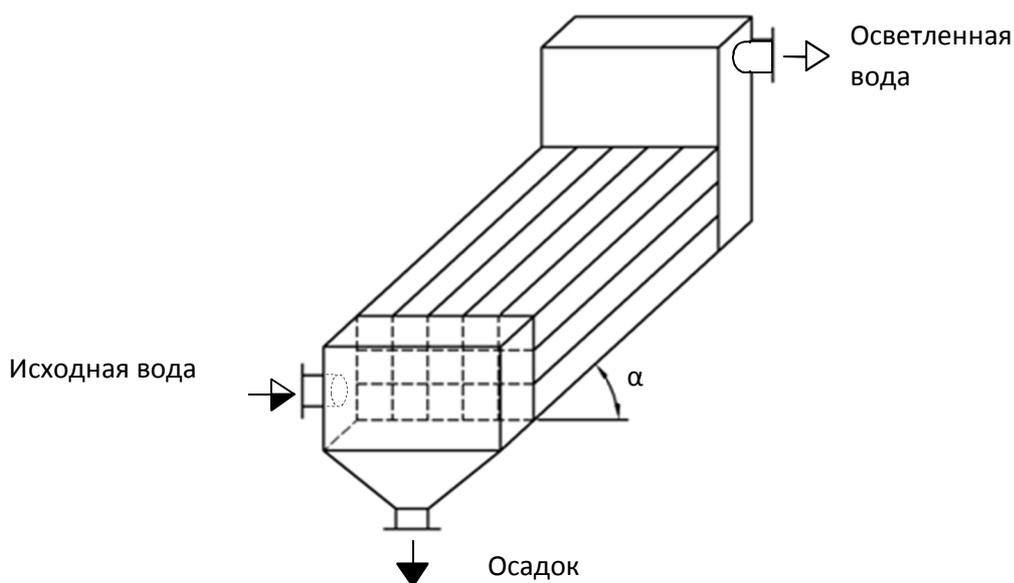


Рисунок 5.5 – Трубчатый отстойник непрерывного действия

прямоточные (рисунок 5.6а), в которых направление движения воды и осадка совпадают;

противоточные (рисунок 5.6б), в которых вода и осадок движутся навстречу друг другу;

со смешанным (комбинированным) движением (рисунок 5.6в) воды и осадка;

перекрестноточные (рисунок 5.6г).

Наибольшее распространение получили противоточные отстойники как наиболее производительные.

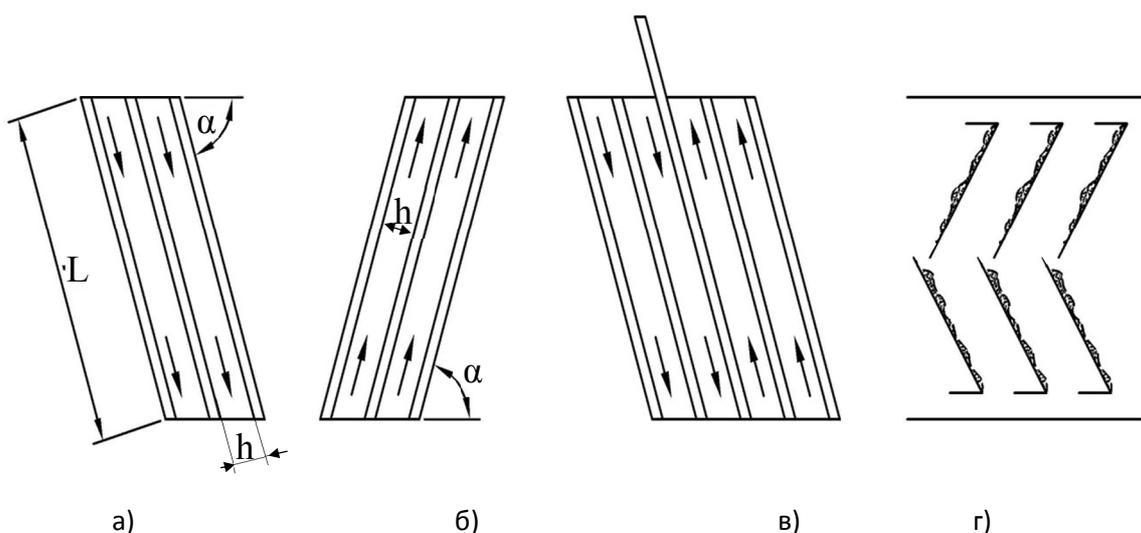


Рисунок 5.6 – Схемы движения воды и осадка в пластинчатых отстойниках

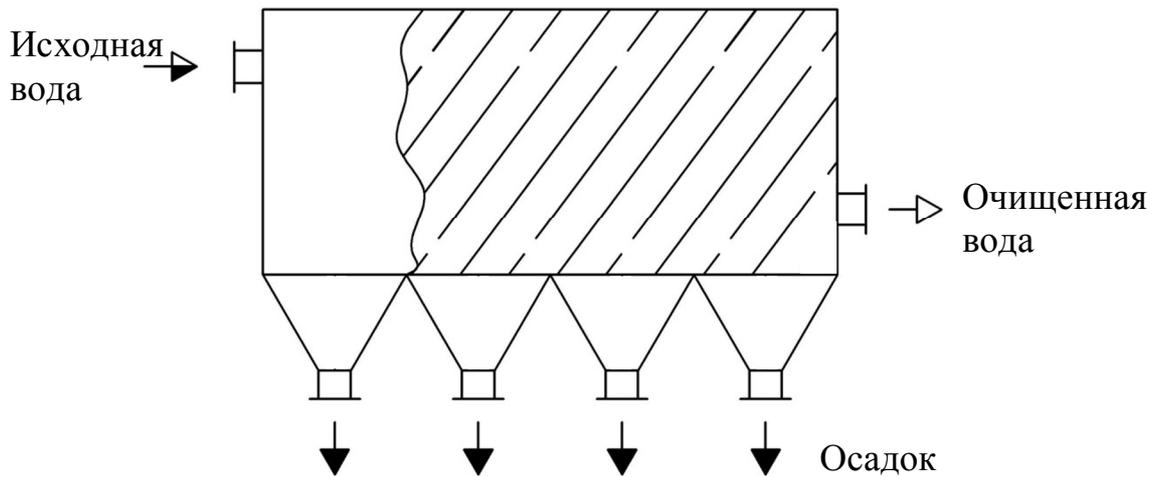


Рисунок 5.7 – Пластинчатый отстойник с комбинированным движением воды и осадка

Пластинчатые отстойники могут использоваться в качестве вторичных осветлителей на сооружениях биологической очистки. Они получили широкое распространение для выделения из сточных вод эмульгированных нефтепродуктов.

Достоинства трубчатых и пластинчатых отстойников заключаются в их экономичности, вследствие небольшого строительного объема, возможности использования пластмасс, что упрощает их изготовление, уменьшает массу и, следовательно, снижает стоимость. Возможность реконструкции существующих емкостных отстойников путем установки трубчатых или пластинчатых блоков (см. рисунки 5.8-5.10) – также важное достоинство [8].

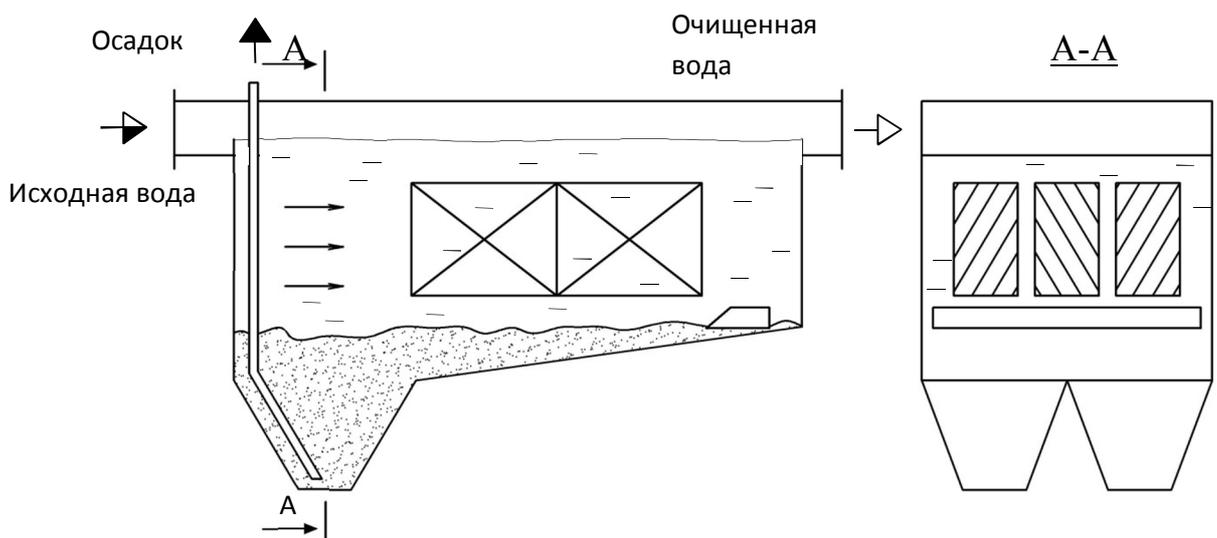


Рисунок 5.8 – Схема установки перекрестноточных пластинчатых блоков в горизонтальном емкостном отстойнике.

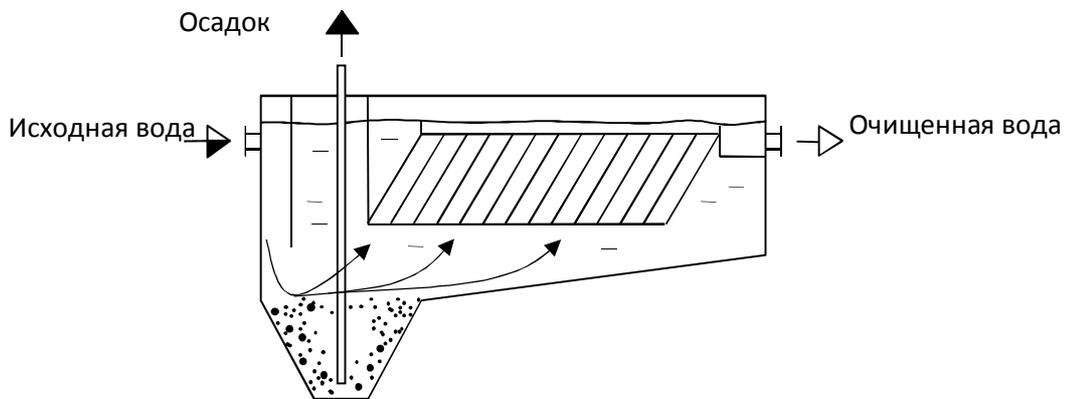


Рисунок 5.9 - Схема установки противоточных пластинчатых блоков в горизонтальном емкостном отстойнике

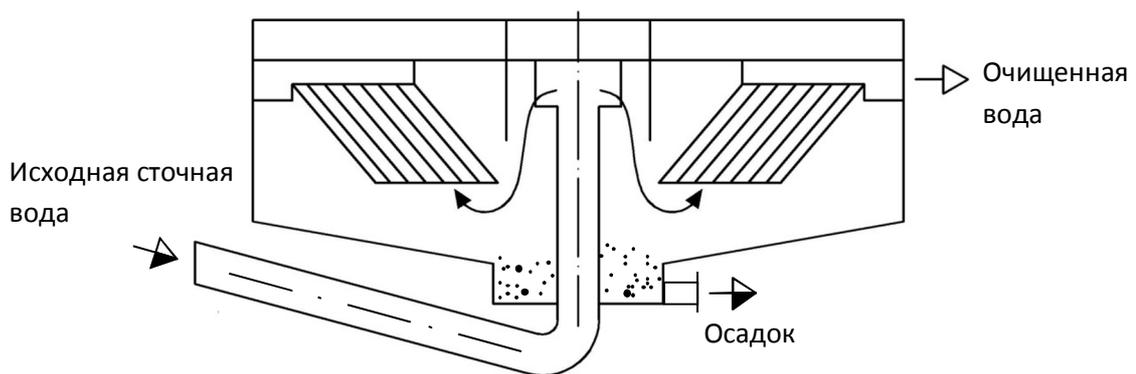


Рисунок 5.10 - Схема установки противоточных пластинчатых блоков в радиальном емкостном отстойнике.

5.2.3 Расчет тонкослойных отстойников

Исходными величинами для расчета являются расход V_c исходной воды (суспензии), начальная x_n и конечная x_k концентрации взвеси, а также ее дисперсность и плотность.

Для обеспечения надежности работы и стабильности качества осветленной воды необходимо поддерживать ламинарный режим течения и устойчивость потока [5,9] в тонкослойном элементе. Ламинарность потока

определяется, как известно, критерием Рейнольдса, причем критическая его величина не должна превышать 2300.

$$Re_{кр} = \frac{u d_э}{\nu_{ж}} \leq 2300. \quad (5.11)$$

Здесь u – средняя скорость потока; $d_э$ – эквивалентный диаметр ячейки (канала) отстойника; $\nu_{ж}$ - кинематический коэффициент вязкости воды.

$$d_э = \frac{4F}{\Pi}, \quad (5.12)$$

где F – площадь поперечного сечения ячейки (канала) отстойника; Π – ее смоченный периметр.

Для ячеек (каналов) прямоугольного сечения с шириной B и высотой h

$$d_э = \frac{4Bh}{2(B+h)} = \frac{2Bh}{(B+h)}; \quad (5.13)$$

Для трубчатых отстойников с ячейками квадратного сечения, для которых $B=h$, эквивалентный диаметр канала $d_э = h$.

Для описания устойчивости потока используется критерий Фруда

$$Fr_{кр} = \frac{u^2}{gR} \leq 10^{-3}, \quad (5.14)$$

где R – гидравлический радиус канала;

$$R = \frac{F}{\Pi} = \frac{d_э}{4}. \quad (5.15)$$

Совместное решение неравенств (5.11) и (5.14) позволяет получить предельные значения максимальной скорости потока и гидравлического радиуса ячейки тонкослойного отстойника

$$u \leq 0,018 \text{ м/с}; \quad R \leq 0,032 \text{ м}; \quad d_э \leq 0,128 \text{ м}.$$

Среднюю скорость потока u рекомендуется принимать в зависимости от концентрации x_n твердой фазы. Для суспензий

слабоконцентрированных ($x_n < 50 \text{ г/м}^3$) $u = 0,015 \text{ м/с}$;

средней концентрации ($x_H = 50 \div 500 \text{ г/м}^3$) – $u = 0,016 \text{ м/с}$;
 весьма высокой концентрации ($x_H = 500 \div 5000 \text{ г/м}^3$) – $u = 0,017 \text{ м/с}$;
 высокой концентрации ($x_H > 5000 \text{ г/м}^3$) – $u = 0,018 \text{ м/с}$.

Геометрические размеры ячейки R или $d_3 = 4 R$ определяют по принятой скорости потока u из неравенств (5.11) и (5.14). Задаваясь соотношением B/h , из формулы (5.13) находят h .

Удельная гидравлическая нагрузка (расход воды через одну ячейку) определяется по формуле

$$V_{\text{яч}} = u B h. \quad (5.16)$$

Число ячеек $n = V_c / V_{\text{яч}}, \quad (5.17)$

где V_c – производительность отстойника по исходной воде, $\text{м}^3/\text{с}$.

Для определения длины зоны отстаивания l в расчет вводится не средняя, а максимальная скорость потока:

$$l = u_{\text{max}} \tau, \quad (5.18)$$

где τ – время осаждения частиц минимального размера, которые мы хотим отделить в отстойнике.

$$\tau = \frac{h}{w_{\text{ос}} \cos \alpha}; \quad (5.19)$$

α – угол наклона пластин отстойника к горизонту.

В трубчатых отстойниках $u_{\text{max}} = 2u$; в пластинчатых – $u_{\text{max}} = 1,5u$.

На частицы, осевшие в тонкослойных элементах, действуют как силы тяжести, заставляющие их сползать в осадочную зону с некоторой скоростью $w_{\text{сп}}$, так и гидродинамические усилия движущегося потока, под действием которых при определенных условиях частицы могут сноситься вдоль поверхности тонкослойных элементов со скоростью $w_{\text{сн}}$. В общем случае расчетную длину тонкослойных элементов определяют по зависимости

$$L = l + l_{\text{сн}}, \quad (5.20)$$

где l – длина участка тонкослойного элемента, необходимая для осаждения частиц расчетной крупности

$$l = \frac{H u_{\text{max}}}{w_{\text{ос}} \cos \alpha}; \quad (5.21)$$

$l_{\text{сн}}$ – длина участка, необходимая для предотвращения выноса частиц с очищенной водой [9];

$$l_{\text{сн}} = \left(\frac{w_{\text{сн}}}{w_{\text{сп}}} \right) \cdot b. \quad (5.22)$$

Скорость сноса частиц $w_{\text{сн}}$ определяется [9] по зависимости

$$w_{\text{сн}} = (a/h) u d_{\text{э}} - 0,228 w_{\text{ос}} k_{\text{тр}} \cos \alpha, \quad (5.23)$$

где $a = 1,5$ для отстойников с пластинчатыми тонкослойными элементами и $a = 2$ для трубчатых отстойников. При отрицательном значении $w_{\text{сн}}$ величину $l_{\text{сн}}$ следует принимать равной нулю.

Скорость сползания $w_{\text{сп},0}$ при нулевой скорости жидкости ($u = 0$) для частиц малых размеров (при $\text{Re} = w_{\text{сп},0} d_{\text{э}} / \nu_{\text{ж}} \leq 1$) находят по зависимости

$$w_{\text{сп},0} = 28,8 w_{\text{ос}} (\sin \alpha - k_{\text{тр}} \cos \alpha), \quad (5.24)$$

где $k_{\text{тр}}$ – экспериментально определяемый коэффициент трения скольжения, зависящий от размера, свойств и формы частиц взвеси и материала тонкослойных элементов; при ориентировочных расчетах для дискретных шарообразных частиц рекомендуется принимать $k_{\text{тр}} = 0,1 \div 0,3$; для частиц коагулированной взвеси или осадков сточных вод $k_{\text{тр}} = 0,6 \div 0,9$.

Скорость сползания $w_{\text{сп}}$ частиц в отстойниках с восходящим или нисходящим течением в зависимости от направления движения воды и осадка может быть больше $w_{\text{сп},0}$, когда они совпадают, или меньше $w_{\text{сп},0}$, когда они противоположны.

$$w_{\text{сп}} / w_{\text{сп},0} = 1 \pm (a/h) d_{\text{э}} (u / w_{\text{сп},0}). \quad (5.25)$$

Для отстойников с восходяще-нисходящим течением, а также для горизонтальных и радиальных, при выполнении тонкослойных элементов с устройствами, препятствующими выносу осевших частиц, или из гофрированных листов, длина $l_{\text{сн}} = 0$.

Пример 1

Рассчитать основные геометрические размеры тонкослойного трубчатого отстойника непрерывного действия с трубами квадратного сечения для очистки от взвешенных веществ $660 \text{ м}^3/\text{сутки}$ воды, содержащей

0,04 кг/м³ твердой фазы, до концентрации 0,012 кг/м³. дисперсный состав твердой фазы задан (рис. 5.11) кривой R(δ). Плотность твердой фазы 2500 кг/м³. Жидкая фаза – вода при температуре 20°C. Коэффициент трения скольжения осадка по материалу труб $k_{тр} = 0,6$. Угол наклона трубок к горизонту $\alpha = 45^\circ$.

Решение

В тонкослойных отстойниках среднюю скорость в трубах рекомендуется принимать в зависимости от концентрации взвеси.

Для слабо концентрированных суспензий ($x_n < 50$ г/м³) $u = 0,015$ м/с.

Для обеспечения надежности работы и стабильности качества осветленной воды необходимо поддерживать в каждом тонкослойном элементе ламинарный режим течения и устойчивость потока.

Для ячеек квадратного сечения эквивалентный диаметр $d_э = h$; гидравлический радиус $R = h/4$.

Из условия (5.11) ламинарности потока

$$h \leq \frac{Re_{кр} v_{ж}}{u} = \frac{2300 \cdot 1 \cdot 10^{-6}}{0,015} = 0,153 \text{ м.}$$

Из условия (5.14) устойчивости потока

$$h \geq \frac{4u^2}{gFr} = \frac{4 \cdot 0,015^2}{9,8 \cdot 0,001} = 0,0918 \text{ м.}$$

Из интервала $0,092 \leq h \leq 0,153$ м принимаем значение $h = 0,100$ м.

Объемный расход сточной воды через ячейку

$$V_{яч} = uh^2 = 0,015 \cdot 0,1^2 = 1,50 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Приток исходной воды на очистку

$$V_c = 660 \text{ м}^3/\text{сут} = 27,5 \text{ м}^3/\text{ч} = 7,64 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Объемный расход сточной воды через ячейку

$$V_{яч} = uh^2 = 0,015 \cdot 0,1^2 = 1,50 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Приток исходной воды на очистку

$$V_c = 660 \text{ м}^3/\text{сут} = 27,5 \text{ м}^3/\text{ч} = 7,64 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Необходимое число ячеек

$$n = \frac{V_c}{V_{яч}} = \frac{7,64 \cdot 10^{-3}}{1,50 \cdot 10^{-4}} = 51.$$

Примем с запасом $n = 54$ и расположим ячейки блоком $9 \times 6 = 54$.

Линейные размеры блока (высота, ширина) составят

$$H = 100 \text{ мм} \times 9 = 900 \text{ мм} \text{ и } B = 100 \times 6 = 600 \text{ мм.}$$

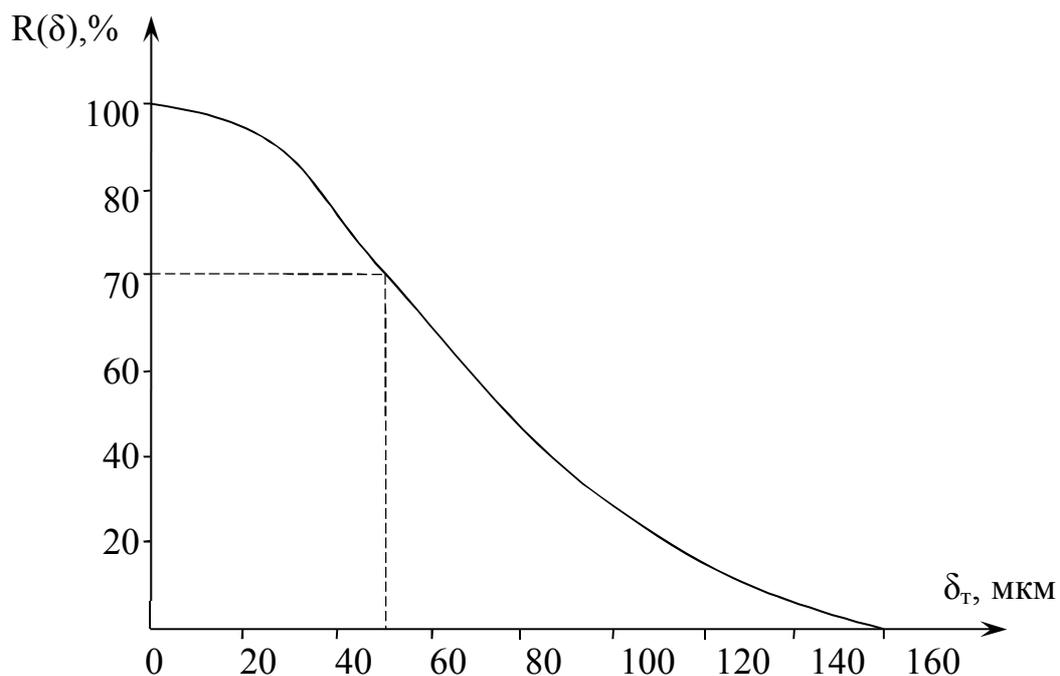


Рисунок 5.11 – Распределение частиц взвесей по размерам (к примеру 1).

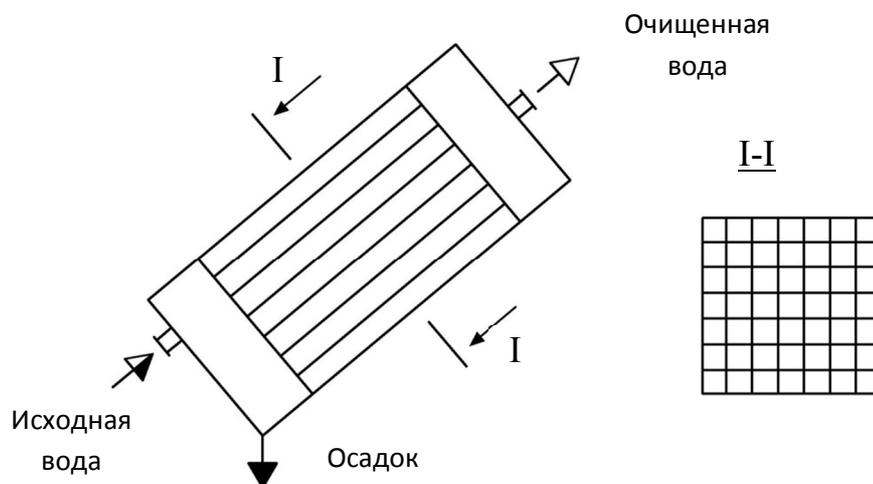


Рисунок 5.12– Расчетная схема к примеру 1.

$$n = \frac{V_c}{V_{\text{яч}}} \frac{7,64 \cdot 10^{-3}}{1,50 \cdot 10^{-4}} = 51.$$

Примем с запасом $n = 54$ и расположим ячейки блоком $9 \times 6 = 54$.
 Линейные размеры блока (высота, ширина) составят
 $H = 100 \text{ мм} \times 9 = 900 \text{ мм}$ и $B = 100 \times 6 = 600 \text{ мм}$.

Требуемая степень очистки исходной воды в отстойнике по формуле (5.3):

$$\eta = \frac{x_H - x_K}{x_H} \cdot 100\% = \frac{0,04 - 0,012}{0,04} \cdot 100\% = 70\%.$$

По графику $R(\delta)$, представленному на рис.5.11, находим, что заданную степень очистки можно получить, удалив все частицы крупнее 50 мкм.

Скорость осаждения частиц минимального размера, подлежащих отделению в отстойнике,

$$w_{oc} = \frac{\delta_{min}^2 (\rho_T - \rho_{ж}) g}{18\mu_{ж}} = \frac{(50 \cdot 10^{-6})^2 \cdot (2500 - 1000) \cdot 9,8}{18 \cdot 10^{-3}} = 0,00204 \text{ м/с.}$$

Необходимое время пребывания сточной воды в ячейке по формуле (5.19)

$$\tau = \frac{0,1}{0,00204 \cdot \cos 45^\circ} = 69,32 \text{ с} \approx 70 \text{ с.}$$

Фактический расход воды через ячейку

$$V_{я} = \frac{V_{ж}}{n} = \frac{V_{ж}}{54} = 1,415 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с.}$$

Фактическая средняя скорость воды в ячейке

$$u = \frac{V_{я}}{h^2} = \frac{1,415 \cdot 10^{-4}}{0,1^2} = 0,01415 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Максимальная скорость воды в ячейке

$$u_{max} = 1,5u = 1,5 \cdot 0,01415 = 0,0212 \text{ м/с.}$$

Длина участка тонкослойного элемента, необходимая для осаждения частиц расчетной крупности, по формуле (5.18)

$$l = u_{max} \cdot \tau = 0,0212 \cdot 70 = 1,49 \text{ м.}$$

Скорость сноса частиц по уравнению (5.23)

$$w_{сн} = \frac{1,5}{0,1} \cdot 0,0145 \cdot 0,1 - 0,228 \cdot 0,00204 \cdot 0,6 \cdot \cos 45^\circ = 0,0281 \text{ м/с.}$$

Скорость сползания осадка по дну трубок отстойника в неподвижной жидкости (при $u = 0$) найдем по формуле (5.24):

$$w_{\text{сп.0}} = 28,8 \cdot 0,00204 (\sin 45^\circ - 0,6 \cdot \cos 45^\circ) = 0,0166 \text{ м/с.}$$

Для определения скорости сползания осадка в противоточном отстойнике воспользуемся соотношением (5.25).

$$\begin{aligned} w_{\text{сп}} &= w_{\text{сп.0}} \left[1 - \left(\frac{a}{h} \right) d_{\text{э}} \left(\frac{u}{w_{\text{сп.0}}} \right) \right] = 0,0166 \left(1 - \frac{1,5}{0,1} \cdot 0,1 \frac{0,01415}{0,0166} \right) \\ &= 0,0138 \text{ м/с.} \end{aligned}$$

Длина участка, необходимая для предотвращения выноса частиц с очищенной водой, по формуле (5.22)

$$l_{\text{сн}} = \frac{0,0281}{0,0138} \cdot 0,1 \approx 0,204 \text{ м.}$$

Расчетная длина тонкослойных элементов по уравнению (5.20)

$$L = 1,98 + 0,204 = 2,184 \text{ м.}$$

6 Гидроциклоны

Отделение дисперсных примесей (твердых и жидких) от воды может быть проведено под действием центробежной силы в гидроциклонах.

Сепарация частиц в гидроциклоне происходит во вращающемся потоке жидкости, который возникает в результате тангенциального подвода воды к цилиндрическому корпусу.

Для очистки природных вод используют напорные гидроциклоны.

Напорные гидроциклоны (рисунок 6.1) представляют собой *закрытые* аппараты, состоящие из цилиндрической и конической частей. Исходная вода *под давлением* поступает по тангенциально расположенному вводу в верхнюю часть цилиндра и приобретает вращательное движение. Возникающие центробежные силы перемещают частицы примесей к стенкам аппарата и по спиральной траектории вниз к выходному патрубку. Очищенная вода удаляется через верхний патрубок.

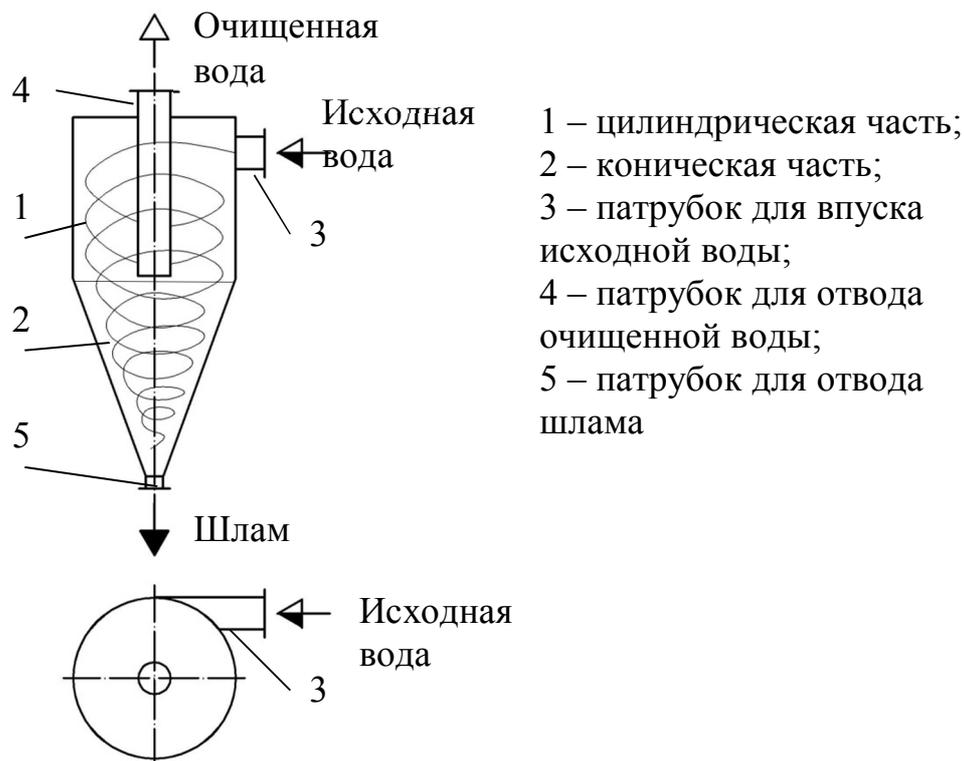


Рисунок 6.1 – Схема напорного гидроциклона

Фактор разделения напорных гидроциклонов ($F_p = w_n^2/Rg$) достигает 200, что обуславливает их высокую эффективность (не менее 70-80%). Напорные гидроциклоны могут иметь диаметры от 50 до 1000 мм. Высота цилиндрической части $H_{ц} \approx D$. Угол конусности $10 \div 20^\circ$. Для удлинения срока службы внутреннюю поверхность аппаратов футеруют износостойкими материалами: твердыми сплавами или резиной.

Гидроциклоны просты по устройству, компактны, их легко обслуживать. По сравнению с отстойниками они отличаются высокой производительностью и небольшой стоимостью.

Гидроциклоны малого диаметра обычно объединяют в общий агрегат, в котором они работают параллельно. Такие аппараты называют *мультигидроциклонами*. Мультициклоны наиболее эффективны при очистке небольших количеств воды от тонкодиспергированных примесей. Увеличение производительности этих аппаратов достигается путем компоновки их в блоки со значительным числом рабочих единиц.

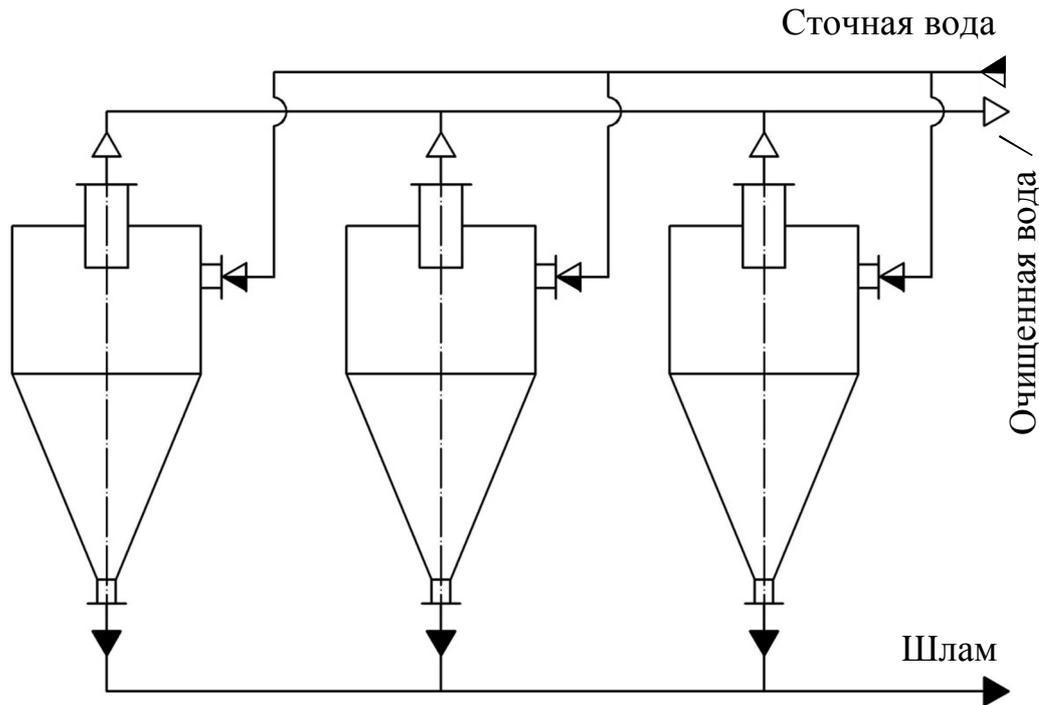


Рисунок 6.2 - Блок напорных циклонов

Для глубокой очистки воды от взвешенных твердых частиц последовательно устанавливают гидроциклоны разных типоразмеров.

Минимальный диаметр частиц, улавливаемых в гидроциклоне, можно оценить [5] по формуле:

$$\delta_{т.мин} = \sqrt{\frac{18w_r\mu_{ж}D}{2,5w_H^2(\rho_T - \rho_ж)}}, \quad (6.1)$$

где D – внутренний диаметр циклона, м; $\mu_{ж}$ – динамическая вязкость воды, Па·с; w_H – скорость воды во входном патрубке, м/с; w_r – скорость движения частицы в радиальном направлении (скорость сепарации), м/с.

Эта зависимость наглядно показывает связь каждой величины, входящей в подкоренное выражение, с размером частиц, сепарируемых в закрученном потоке жидкости. Здесь подтверждается общеизвестное правило, что для улавливания мелкодисперсных частиц следует применять циклоны уменьшенных диаметров.

Увеличение начальной скорости жидкости w_H во входном патрубке гидроциклона способствует сепарации более мелких частиц. Однако, как показала практика, эта скорость не должна превышать $5 \div 10$ м/с.

Выражение (6.1) в том виде, в каком оно представлено, не позволяет рассчитать размер осаждающейся частицы, потому что содержит неизвестную величину скорости сепарации w_r . Обычно из этого затруднительного положения выходят следующим образом. Выдвигается допущение, что частица, вошедшая в циклон вблизи выхлопной трубы (на радиусе R_1), должна осесть на стенке циклона с радиусом $R_2=D/2$ за время прохождения ею цилиндрической части аппарата.

Если принять, что по характеру движения частиц циклон работает в режиме идеального вытеснения, то это время

$$\tau = \frac{(R_2 - R_1)}{w_r} = \frac{v_{ж}}{V_{ж}} = \frac{\pi h_{ц}(R_2^2 - R_1^2)}{V_{ж}}, \quad (6.2)$$

откуда

$$w_r = \frac{V_{ж}}{\pi h_{ц}(R_2 + R_1)}, \quad (6.3)$$

где $v_{ж}$ и $h_{ц}$ - соответственно объем и высота цилиндрической части гидроциклона.

Равенство (6.3) при оценке w_r можно принять только приближенно, поскольку в нем учтено время пребывания частиц только в цилиндрической части циклона, а осаждение частиц происходит и в конической части аппарата.

Если все же за основу расчета взять зависимости (5.1) и (5.3), то при известной дисперсионной характеристике твердой фазы $R(\delta) = f(\delta_T)$, эффективность циклона можно оценить по равенству

$$\eta = R(\delta_{T.min}). \quad (6.4)$$

Пример 2

Требуется очистить в гидроциклонах 80 м³/час сточной воды, содержащей 0,3 г/л твердых примесей плотностью 2500 кг/м³ до остаточной концентрации твердой фазы 0,09 г/л. Дисперсный состав примесей задан функцией $D(\delta_T)$. Определить требуемый диаметр и количество гидроциклонов.

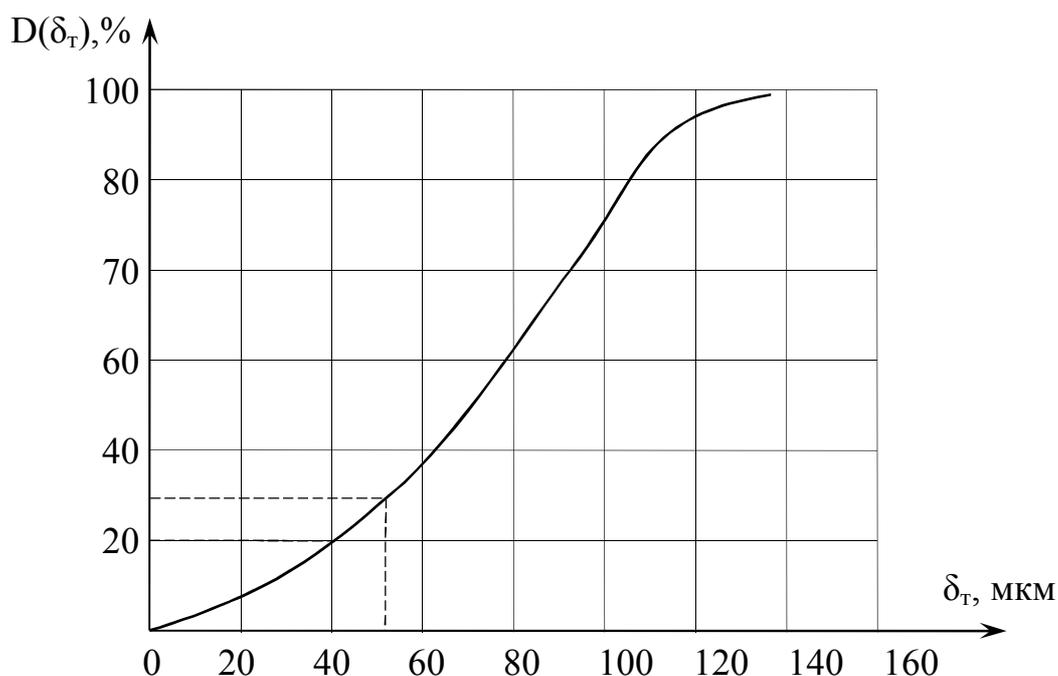


Рисунок 6.3 – Функция распределения частиц по размерам

Решение

Требуемая степень очистки сточной воды от твердых примесей

$$\eta = \frac{0,3 - 0,09}{0,3} \cdot 100\% = 70\%$$

Допустимый проскок

$$\text{Пр} = 100 - \eta = 100 - 70 = 30\%$$

Учитывая (6.4),

$$\text{Пр} = 100 - R(\delta_{T.min}) = D(\delta_{T.min}).$$

По графику (рисунок 6.3) определяем, что для обеспечения заданной степени очистки необходимо выделить из сточной воды все частицы крупнее $\delta_{T.min} = 50$ мкм.

В таблице 6.1 представлены параметры стандартных напорных гидроциклонов. Нужную нам производительность имеет гидроциклон с диаметром $D = 350$ мм.

Таблица 6.1 – Параметры стандартных напорных гидроциклонов

Диаметр цилиндрической части, мм	Размеры элементов, доли диаметра циклона				Потери напора, м	Производительность, м ³ /ч
	диаметр впуска	диаметр верхнего слива	диаметр нижнего слива	высота цилиндрической части		
50	0,28	0,40	0,12	1	10-15	3-4
75	0,24	0,27	0,12	1	15-20	5-6
250	0,2	0,23	0,10	0,7	15-25	46-53
350	0,18	0,22	0,07	0,88	20-30	75-85
500	0,13	0,22	0,05	0,80	25-35	85-90

Определим, может ли этот гидроциклон уловить частицы с $\delta_{т.мин} = 50$ мкм. Рассчитаем минимальный диаметр частицы, улавливаемой в гидроциклоне заданного размера.

По таблице 6.1 определяем основные геометрические размеры гидроциклона с диаметром $D = 350$ мм.

Высота цилиндрической части

$$h_{ц} = 0,88D = 0,88 \cdot 0,35 = 0,308 \text{ м};$$

Радиус выхлопной трубы

$$R_1 = 0,11D = 0,11 \cdot 0,35 = 0,0385 \text{ м};$$

Радиус внутренней поверхности циклона

$$R_2 = 0,5 D = 0,5 \cdot 0,35 = 0,175 \text{ м}.$$

Диаметр впускного патрубка

$$d_{en} = 0,18 D = 0,18 \cdot 0,35 = 0,063 \text{ м}.$$

Скорость сепарации частиц по формуле (6.3)

$$w_r = \frac{80}{3600 \cdot 3,14 \cdot 0,308 \cdot (0,175 + 0,0385)} = 0,108 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Скорость сточной воды во впускном патрубке

$$w_n = \frac{V_{\text{ст}}}{\pi d_{\text{вп}}^2 / 4} = \frac{4 \cdot 80}{3600 \cdot 3,14 \cdot 0,063^2} = 7,13 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Минимальный диаметр частицы, улавливаемой в гидроциклоне, по формуле (6.1)

$$\delta_{\text{т. min}} = \sqrt{\frac{18 \cdot 0,108 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,35}{2,5 \cdot 7,13^2 \cdot (2500 - 1000)}} = 5,98 \cdot 10^{-5} \text{ м} = 59,8 \text{ мкм}$$

Циклон с диаметром $D = 350$ мм не обеспечит нужной степени очистки, поскольку $59,8 > 50$ мкм.

Рассмотрим стандартный гидроциклон с ближайшим меньшим диаметром $D = 250$ мм. Таких гидроциклонов потребуется уже не один, а два (должны работать в группе, параллельно), так как производительность одного гидроциклона недостаточна.

Через каждый гидроциклон пойдет объемный расход воды

$$V_{\text{ст}} = 80/2 = 40 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Проверим, обеспечивается ли при этом требуемый диаметр улавливаемых частиц 50 мкм.

Основные геометрические размеры гидроциклонов с $D = 250$ мм:

$$h_{\text{ц}} = 0,7D = 0,7 \cdot 0,25 = 0,175 \text{ м}; \quad R_1 = \frac{0,23D}{2} = 0,23 \cdot \frac{0,25}{2} = 0,0288 \text{ м};$$

$$R_2 = 0,5 D = 0,5 \cdot 0,25 = 0,125 \text{ м}; \quad d_{\text{вп}} = 0,2 D = 0,2 \cdot 0,25 = 0,050 \text{ м}.$$

Скорость сепарации твердой фазы по (6.3)

$$w_r = \frac{40}{3600 \cdot 3,14 \cdot 0,175 \cdot (0,125 + 0,0288)} = 0,1315 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Скорость сточной воды во впускном патрубке

$$w_H = \frac{40 \cdot 4}{3600 \cdot 3,14 \cdot 0,05^2} = 5,66 \text{ м/с.}$$

Минимальный диаметр улавливаемой частицы по формуле (5.1)

$$\delta_{т.мин} = \sqrt{\frac{18 \cdot 0,1315 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,25}{2,5 \cdot 5,66^2 \cdot (2500 - 1000)}} = 70,2 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

Вариант с двумя гидроциклонами, имеющими $D = 250$ мм, не подходит.

Не остается ничего другого, как взять батарею из 16 гидроциклонов диаметром $D = 75$ мм производительностью $5 \text{ м}^3/\text{ч}$ каждый.

В этом случае

$$h_{ц} = D = 0,075 \text{ м}; \quad R_1 = \frac{0,27D}{2} = 0,27 \cdot \frac{0,075}{2} = 0,010 \text{ м};$$

$$R_2 = 0,5 D = 0,5 \cdot 0,075 = 0,0375 \text{ м}; \quad d_{ен} = 0,24 D = 0,24 \cdot 0,075 = 0,018 \text{ м.}$$

$$w_r = \frac{5}{3600 \cdot 3,14 \cdot 0,075 \cdot (0,0375 + 0,010)} = 0,124 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$w_H = \frac{5 \cdot 4}{3600 \cdot 3,14 \cdot 0,018^2} = 5,46 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

$$\delta_{т.мин} = \sqrt{\frac{18 \cdot 10^{-3} \cdot 0,124 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 0,075}{2,5 \cdot 5,46^2 \cdot (2500 - 1000)}} = 38,7 \cdot 10^{-6} \text{ м.}$$

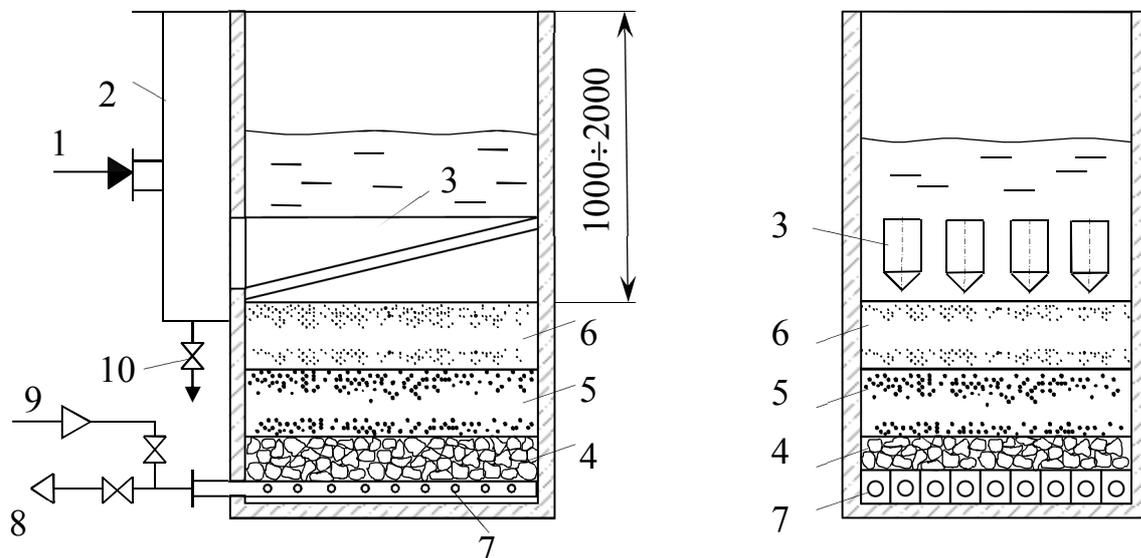
Поскольку минимальный диаметр улавливаемых частиц $\delta_{т.мин} < 50$ мкм, то окончательно принимаем для очистки воды группу из 16 гидроциклонов диаметром $D = 75$ мм как обеспечивающую требуемую степень очистки.

7 Зернистые фильтры

В процессах водоподготовки, как правило, приходится иметь дело с большими объемными расходами, поэтому стараются применять фильтры, для работы которых не требуется высоких давлений. Этому требованию удовлетворяют фильтры с зернистым слоем.

Фильтр с зернистой загрузкой (рисунок 7.1) представляет собой резервуар, в нижней части которого имеется дренажное устройство для отвода воды. На дренаж укладывают слой поддерживающего материала

(гравия, щебенки и т.п.), а затем фильтрующий материал. При ухудшении качества фильтрата или значительном увеличении гидравлического сопротивления фильтра проводится промывка фильтрующего материала загрузки псевдоожижением его обратным током фильтрата.



1 – подача сточной воды; 2 – карман; 3 – желоб; 4 – поддерживающий слой гравия; 5 – слой кварцевого песка; 6 – слой антрацита; 7 – дренаж; 8 – отвод фильтрата; 9 – подача промывной воды; 10 – отвод промывной воды.

Рисунок 7.1 - Открытый двухслойный зернистый фильтр

В верхней части фильтра укреплены распределительные желоба для подачи исходной воды и отвода загрязненной промывной воды.

Дренажное устройство в виде системы перфорированных труб предназначено для отвода очищенной воды и равномерного распределения промывной воды. Дренажное устройство может быть выполнено также из пористобетонных плит. В этом случае поддерживающий слой гравия не нужен.

Фильтры с зернистым слоем подразделяют на открытые и напорные. Высота слоя воды над зернистым материалом в открытых фильтрах равна $1 \div 2$ м; в напорных $0,5 \div 1$ м.

Напорные фильтры представляют собой закрытые резервуары цилиндрической формы. Их рассчитывают на давление $0,4 \div 0,6$ МПа. Напор воды в закрытых фильтрах создается насосами.

По скорости фильтрования зернистые фильтры подразделяют на медленные (скорость фильтрования $w_{\phi} = 0,5 \div 2$ м/ч), скорые ($2 \div 25$ м/ч) и сверхскорые (более 25 м/ч).

Требуемая площадь фильтра S_{ϕ} определяется объёмным расходом обрабатываемой воды и рекомендуемой скоростью фильтрования

$$S_{\phi} = \frac{V_{\text{ж}}}{w_{\phi}}. \quad (7.1)$$

Достоинством *медленных фильтров* является высокая степень очистки сточных вод. Недостатки: большие размеры, высокая стоимость и сложная очистка от осадка.

Промывку фильтров, как правило, проводят очищенной водой (фильтратом), подавая ее снизу вверх. На эти цели расходуется приблизительно 3÷5% объема фильтрата. Промывная вода поступает под давлением в дренажную систему фильтра, равномерно распределяется по его площади и поднимается вверх через загрузку со скоростью, обеспечивающей переход зёрен загрузки во взвешенное состояние. При этом зерна загрузки сталкиваются друг с другом, в результате чего налипшие загрязнения отмываются потоком промывной воды и выносятся из загрузки. Для эффективной отмывки зерен требуется относительное расширение слоя загрузки на 25÷50%. Продолжительность промывки, как правило, составляет 5÷7 мин. Интенсивность промывки (расход воды на единицу площади фильтра) обычно находится в пределах от 12 до 18 л/(м²·с). Увеличение интенсивности промывки, хотя и позволяет лучше отмыть загрузку, однако приводит к нежелательному возрастанию расхода промывной воды, может вызвать смешение фильтрующих и поддерживающих слоев. Хорошие результаты дает водо-воздушная промывка, при которой зернистый слой сначала продувают воздухом для разрыхления, а затем подают промывную воду.

К фильтрующим материалам предъявляется ряд требований. Они должны обладать определенным фракционным составом, механической прочностью на истирание и измельчение, химической стойкостью к воде и ее примесям, должны быть доступными и иметь невысокую стоимость.

Фракционный состав зерен фильтрующей загрузки определяет производительность фильтров. Использование очень крупного фильтрующего материала приводит к увеличению пропускной способности фильтра и снижению качества фильтрата. Мелкий фильтрующий материал вызывает уменьшение продолжительности фильтроцикла и перерасход промывной воды. Увеличение степени неоднородности зерен загрузки ухудшает условия промывки фильтрующего материала, а также обуславливает концентрирование мелких частиц на поверхности загрузки

вследствие гидравлической классификации частиц при промывке. Последнее приводит к образованию на поверхности фильтрующего слоя пленки, состоящей из взвешенных частиц и препятствующей фильтрованию воды.

Недостаточная механическая прочность фильтрующего материала может приводить к его истиранию, что способствует увеличению гидравлического сопротивления загрузки и уносу материала промывной водой.

Химическая стойкость материала загрузки – одно из основных условий, предотвращающих загрязнение очищаемой воды и изменение свойств фильтрующего материала в процессе эксплуатации фильтров.

Наиболее широко применяются такие фильтрующие материалы, как: кварцевый песок, дробленый антрацит, керамическая крошка, доломит, магнетит. В последнее время получили распространение керамзит и пористые пластмассы (полистирол, полиуретан и др.). Для загрузки скорых фильтров применяют среднезернистый песок (0,35÷1,5 мм) и крупнозернистый песок (0,5÷2 мм). Размер зерен антрацита должен быть в пределах 0,8÷1,8 мм. Для загрузки медленных фильтров используют мелкозернистый кварцевый песок с размерами частиц менее 0,35 мм.

Важными характеристиками зернистого слоя являются порозность (ε) и удельная поверхность ($s_{уд}$). Порозность – объемная доля пустот в слое – зависит от структуры пористой среды и связана с размером зерен, образующих слой, их формой и укладкой.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\nu_{ТВ}}{\nu_{СЛОЯ}}, \quad (7.2)$$

где $\nu_{ТВ}$ и $\nu_{СЛОЯ}$ – соответственно объем зерен твердого материала и объем зернистого слоя, м³.

Удельная поверхность слоя (поверхность частиц в единице объема слоя, м²/м³) определяется не только порозностью, но и пористостью отдельных зерен, а также зависит от формы зерен.

Удельную поверхность слоя вычисляют по формуле

$$s_{уд} = \frac{6(1 - \varepsilon)\Psi}{\delta_{ЭЗ}}, \quad (7.3)$$

где Ψ – коэффициент формы зерен; $\delta_{ЭЗ}$ – эквивалентный диаметр зерен, м.

Коэффициент формы зерен существенно влияет также на емкость фильтрующего слоя (грязеёмкость) и на коэффициент гидравлического сопротивления. Для частиц сферической формы $\Psi = 1$.

Извлечение частиц из воды в зернистом слое происходит за счет следующих физических явлений:

- процеживание, при котором извлечение частиц является чисто механическим;
- гравитационное осаждение;
- инерционное захватывание;
- адсорбция (физическая и химическая);
- адгезия;
- коагуляционное осаждение;
- биологическая очистка.

В общем случае эти механизмы могут действовать совместно, и процесс фильтрования состоит из трех стадий;

- перенос частиц на поверхность вещества, образующего слой;
- прикрепление к поверхности;
- отрыв от поверхности.

По характеру механизма задерживания взвешенных частиц различают два вида фильтрования:

- фильтрование через пленку (осадок) загрязнений, образующуюся на поверхности зерен загрузки;
- фильтрование без образования пленки загрязнений.

В первом случае задерживаются частицы, размер которых больше пор материала, а затем образуется слой загрязнений, который является также фильтрующим материалом. Такой процесс характерен для медленных фильтров, которые работают при малых скоростях фильтрования.

Во втором случае фильтрование происходит в толще слоя загрузки, где частицы загрязнений удерживаются на зернах фильтрующего материала адгезионными силами. Такой процесс характерен для скоростных фильтров.

В процессе фильтрования происходит накопление загрязнений в слое загрузки. В какой-то момент наблюдается вынос частиц в фильтрат с ухудшением его качества. Продолжительность работы фильтра до проскока частиц в фильтрат называют временем защитного действия загрузки τ_3 . Его определяют по формуле

$$\tau_3 = k \frac{E \nu_{\text{слоя}}}{V_{\text{ж}}(c_{\text{н}} - c_{\text{к}})}, \quad (7.4)$$

где k – коэффициент, учитывающий нестабильность процесса; $k = 0,85$; E – грязеемкость единицы объема загрузки, $\text{кг}/\text{м}^3$ (определяется экспериментально); $V_{\text{ж}}$ – объемный расход обрабатываемой воды, $\text{м}^3/\text{с}$; $c_{\text{н}}$, $c_{\text{к}}$ – начальная и конечная концентрации загрязнений в воде, $\text{кг}/\text{м}^3$.

По мере загрязнения фильтрующего слоя уменьшается его порозность и увеличивается сопротивление при прохождении через него обрабатываемой воды, т.е. растут потери напора. Время работы фильтра до достижения потерь напора предельной величины обозначим через $\tau_{\text{к}}$. Оптимальным условием работы фильтра является $\tau_3 \approx \tau_{\text{к}}$.

Гидравлическое сопротивление зернистого фильтра складывается из потерь давления в местных сопротивлениях аппарата и потерь давления в неподвижном зернистом слое

$$\Delta p = \sum_{i=1}^n \Delta p_{\text{мс}i} + \Delta p_{\text{сл}}. \quad (7.5)$$

Суммарные потери давления в местных сопротивлениях зависят от конструкции аппарата. Это могут быть, например, потери давления при входе жидкости в аппарат и на выходе из него (в штуцерах), потери на распределительных лотках, в дренажном устройстве и т.д. Потери давления на местных сопротивлениях рассчитываются по хорошо известной формуле

$$\Delta p_{\text{мс}i} = \zeta_i \frac{\rho_{\text{ж}} w_{\text{ж}i}^2}{2}, \quad (7.6)$$

где ζ_i – соответствующий коэффициент местного сопротивления; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; $w_{\text{ж}i}$ – скорость жидкости в узком сечении, $\text{м}/\text{с}$.

Наибольшие затруднения при использовании формулы (6.5) связаны с определением величины $\Delta p_{\text{сл}}$. Потери давления в слое могут быть рассчитаны достоверно только для исходного незагрязненного слоя загрузки.

Зернистый слой представляют как систему извилистых межзерновых каналов, имеющих эквивалентный диаметр

$$d_{\text{ЭК}} = 4 \frac{\varepsilon}{s_{\text{уд}}}, \quad (7.7)$$

где ε – порозность зернистого слоя; $s_{\text{уд}}$ – удельная поверхность зерен, $\text{м}^2/\text{м}^3$.

$$s_{\text{уд}} = \frac{F_3}{v_3} (1 - \varepsilon) = \frac{\pi \delta_3^2}{\pi \delta_3^3 / 6} (1 - \varepsilon) = \frac{6(1 - \varepsilon)}{\delta_3}. \quad (7.8)$$

Отсюда

$$d_{\text{ЭК}} = 4 \frac{\varepsilon \delta_3}{6(1 - \varepsilon)} = \frac{2}{3} \delta_3 \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}. \quad (7.9)$$

Для беспорядочно засыпанного слоя чистой (промытой) загрузки можно принимать $\varepsilon = \varepsilon_0 = 0,4$.

Задача о гидравлическом сопротивлении канала любой формы решается с помощью уравнения Дарси – Вейсбаха

$$\Delta p_{\text{сл}} = \lambda \frac{l_{\text{к}}}{d_{\text{ЭК}}} \frac{\rho_{\text{ж}} w_{\text{к}}^2}{2} \quad (7.10)$$

где λ – коэффициент гидравлического трения жидкости о зернистый материал загрузки; $l_{\text{к}}$ – длина межзернового канала, м; $w_{\text{к}}$ – средняя скорость жидкости в межзерновом канале, м/с.

В неподвижном зернистом слое каналы, образованные зазорами между частицами, имеют извилистую форму и переменное сечение. Длина межзернового канала

$$l_{\text{к}} = L \cdot K_{\text{из}}, \quad (7.11)$$

где L – высота зернистого слоя; $K_{\text{из}}$ – коэффициент извилистости

$$K_{\text{из}} = \varepsilon + \frac{\pi}{2} (1 - \varepsilon). \quad (7.12)$$

Средняя скорость жидкости в канале

$$w_{\text{к}} = \frac{w_{\text{ф}} K_{\text{из}}}{\varepsilon}, \quad (7.13)$$

где w_ϕ – скорость сточной воды, приведенная к свободному сечению аппарата, м/с.

$$w_\phi = \frac{V_{\text{ж}}}{S_\phi} \quad (7.14)$$

Входящий в уравнение Дарси-Вейсбаха (7.10) коэффициент трения λ жидкости о зернистый слой следует рассчитывать по формуле Розе

$$\lambda = \frac{40}{Re_{\text{ЭК}}} + \frac{2,28}{Re_{\text{ЭК}}^{0,5}} + 0,46, \quad (7.15)$$

где

$$Re_{\text{ЭК}} = \frac{w_{\text{к}} d_{\text{ЭК}}}{\nu_{\text{ж}}}. \quad (7.16)$$

С учетом выше приведенных зависимостей уравнение (7.10) может быть приведено к более удобной для расчета формуле

$$\Delta p_{\text{сл}} = \frac{3 \lambda L (1 - \varepsilon) K_{\text{из}}^3 \rho_{\text{ж}} w_\phi^2}{4 \delta_3 \varepsilon^3}. \quad (7.17)$$

Сопротивление единицы толщины фильтрующего слоя в начальный момент времени обозначим через Δp_0

$$\Delta p_0 = \frac{3 \lambda L (1 - \varepsilon_0) w_\phi^2}{4 \delta_3 \varepsilon_0^3}, \quad (7.18)$$

где ε_0 – начальная порозность чистого (незагрязненного) слоя.

По мере накопления загрязнений в фильтрующем слое его порозность уменьшается, поскольку межзерновые каналы забиваются осадком. В произвольный момент времени τ порозность составляет

$$\varepsilon(\tau) = \varepsilon_0 - \Delta\varepsilon(\tau), \quad (7.19)$$

где $\Delta\varepsilon(\tau)$ – объемная доля осадка, накопившегося в фильтрующем слое к моменту времени τ ;

$$\Delta\varepsilon(\tau) = \frac{v_{\text{ос}}(\tau)}{v_{\text{слоя}}} \quad (7.20)$$

Наибольший интерес представляет максимальное значение потерь давления в слое в момент окончания процесса фильтрации $(\Delta\varepsilon)_k$. Его рассчитывают при конечном минимальном значении порозности слоя

$$\varepsilon_k = \varepsilon_0 - (\Delta\varepsilon)_k, \quad (7.21)$$

где $(\Delta\varepsilon)_k$ – объемная доля осадка, накопившаяся в слое к концу процесса.

Объем осадка, накопившегося к концу процесса

$$v_{\text{ос } k} = \frac{V_{\text{ст}}(c_{\text{н}} - c_{\text{к}})\tau_k}{\rho_{\text{ос}}}, \quad (7.22)$$

где $c_{\text{н}}, c_{\text{к}}$ – начальная и конечная концентрация загрязнений, кг/м^3 ; τ_k – время окончания процесса, $\tau_k = \tau_3$.

$$(\Delta\varepsilon)_k = \frac{v_{\text{ос.к}}}{v_{\text{слоя}}}. \quad (7.23)$$

Максимальное сопротивление зернистого слоя рассчитывают так же, как и начальное, но при значении порозности

$$\varepsilon_k = \varepsilon_0 - \frac{V_{\text{ст}}(c_{\text{н}} - c_{\text{к}})\tau_k}{\rho_{\text{ос}} v_{\text{слоя}}}. \quad (7.24)$$

Пример 3

Рассчитать требуемый диаметр однослойного напорного фильтра с неподвижным слоем зернистой загрузки, время фильтроцикла и необходимый напор обслуживающего его насоса. Загрузка – монодисперсный кварцевый песок с частицами шарообразной формы $\delta_3 = 1,2$ мм. Начальная порозность слоя $\varepsilon_0 = 0,4$. Объемный расход осветляемой воды $V_{\text{ж}} = 10 \text{ м}^3/\text{ч}$. Рекомендуемая скорость фильтрования $w_{\text{ф}} = 6 \text{ м/ч}$. Высота слоя $L = 0,8$ м. Грязеемкость слоя $E = 420 \text{ кг/м}^3$.

Начальная концентрация взвешенных веществ $c_H = 0,15 \text{ кг/м}^3$; требуемая их конечная концентрация $c_K = 0,01 \text{ кг/м}^3$. Плотность осадка $\rho_{ос} = 1105 \text{ кг/м}^3$. Суммарное гидравлическое сопротивление распределительной системы и дренажа $\Sigma \Delta p_{мс} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Решение

Площадь поперечного сечения фильтра по формуле (7.1)

$$S = 10/6 = 1,667 \text{ м}^2.$$

Диаметр фильтра

$$D = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,667}{3,14}} = 1,457 \text{ м}.$$

Примем диаметр фильтра равным 1,5 м. Тогда фактическая скорость фильтрования составит

$$w_{\phi} = \frac{V_{ст}}{S} = \frac{4V_{ст}}{\pi D^2} = \frac{4 \cdot 10}{3600 \cdot 3,14 \cdot 1,5^2} = 0,00157 \text{ м/с}.$$

Объем зернистого слоя

$$v_{сл} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot L = \frac{3,14}{4} \cdot 1,5^2 \cdot 0,8 = 1,413 \text{ м}^3$$

Длительность фильтроцикла по формуле (7.4)

$$\tau_K = \tau_z = 0,85 \frac{420 \cdot 1,413}{10(0,15 - 0,01)} = 360,3 \text{ ч}$$

Объем осадка, накапливающийся в слое к моменту окончания фильтроцикла,

$$v_{ос} = \frac{m_{ос}}{\rho_{ос}} = \frac{V_{ст}(c_H - c_K)\tau_K}{\rho_{ос}} = \frac{10 \cdot (0,15 - 0,01) \cdot 360,3}{1105} = 0,456 \text{ м}^3.$$

Уменьшение порозности слоя к моменту окончания фильтроцикла по формуле (5.26)

$$\Delta \varepsilon_k = \frac{0,456}{1,413} = 0,323.$$

Конечная порозность слоя по формуле (7.24)

$$\varepsilon_k = 0,4 - 0,323 = 0,077.$$

При минимальном значении порозности слоя в конце фильтроцикла

- коэффициент извилистости межзерновых каналов по (7.12)

$$K_{из} = 0,077 + \frac{3,14}{2} (1 - 0,077) = 1,526;$$

- эквивалентный диаметр межзерновых каналов по (7.9)

$$d_{эк} = \frac{2}{3} \delta_z \frac{\varepsilon_k}{1 - \varepsilon_k} = \frac{2}{3} \cdot 0,0012 \cdot \frac{0,077}{0,923} = 6,67 \cdot 10^{-5} \text{ м};$$

- скорость сточной воды в межзерновых каналах по (7.13)

$$w_k = \frac{w_\phi K_{из}}{\varepsilon_k} = \frac{0,00157 \cdot 1,526}{0,077} = 0,0311 \frac{\text{м}}{\text{с}};$$

- критерий Рейнольдса

$$Re_{эк} = \frac{w_k d_{эк}}{\nu_{ж}} = \frac{0,0311 \cdot 6,67 \cdot 10^{-5}}{1,0 \cdot 10^{-6}} = 2,074;$$

- коэффициент гидравлического трения по (7.15)

$$\lambda = \frac{40}{2,074} + \frac{2,28}{2,074^{0,5}} + 0,46 = 19,6 + 1,6 + 0,46 = 21,33.$$

Потери давления в неподвижном зернистом слое по формуле (7.17)

$$\Delta p_{сл} = \frac{3}{4} \cdot \frac{21,33 \cdot 0,8 \cdot (1 - 0,077) \cdot 1,526^3 \cdot 1000 \cdot 0,00157^2}{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,077^3} = 1,82 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

Потери давления на фильтре в целом

$$\Delta p_\phi = \sum \Delta p_{мс} + \Delta p_{сл} = 1,5 \cdot 10^5 + 1,82 \cdot 10^5 = 3,32 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Необходимо выбирать насос с напором

$$H > \frac{\Delta p_\phi}{\rho_{жg}} = \frac{3,32 \cdot 10^5}{1000 \cdot 9,8} = 33,9 \text{ м вод. ст.}$$

Принимаем напор насоса $H = 40 \text{ м}$.

8 Обеззараживание воды

8.1 Методы обеззараживания воды

При предварительном хлорировании воды, коагулировании ее примесей с последующим отстаиванием и фильтрованием не удается достичь полного удаления болезнетворных микроорганизмов. До 10% хлоррезистентных бактерий и вирусов, среди которых могут быть и патогенные, сохраняют свою жизнеспособность. Поэтому заключительным этапом подготовки воды питьевой кондиции является ее обеззараживание. Использование для питья подземной воды в большинстве случаев возможно и без обеззараживания.

Эффект обеззараживания воды контролируют, определяя общее число бактерий в 1 см³ воды и количество индикаторных бактерий группы кишечной палочки в 1 л воды после ее обеззараживания. По ГОСТ 2874-82 «Вода питьевая» общее число бактерий в 1 см³ неразбавленной воды должно быть не более 100, а количество бактерий группы кишечной палочки в 1 л (коли-индекс) - не более 3. Объем воды, в котором содержится одна кишечная палочка (коли-титр), должен быть не менее 300 мл.

В технологии водоподготовки известно много методов обеззараживания воды, которые можно классифицировать на четыре основные группы: термический; с помощью сильных окислителей; олигодинамия (воздействие ионов благородных металлов); физический (с помощью ультразвука, радиоактивного излучения, ультрафиолетовых лучей). Из перечисленных методов наиболее широко применяют методы второй группы. В качестве окислителей используют хлор, диоксид хлора, озон, йод, марганцовокислый калий; пероксид водорода, гипохлорит натрия и кальция. В свою очередь, из перечисленных окислителей на практике отдают предпочтение хлору, озону, гипохлориту натрия. Выбор метода обеззараживания воды производят, руководствуясь расходом и требованиями к качеству обрабатываемой воды, эффективностью ее предварительной очистки, условиями поставки, транспорта и хранения реагентов, возможностью автоматизации процессов и механизации трудоемких работ.

Обеззараживанию подвергается вода, уже прошедшая предшествующие стадии обработки: коагулирование, осветление и обесцвечивание в слое взвешенного осадка (или отстаивание), фильтрование, так как в фильтрате отсутствуют частицы, на поверхности или внутри

которых могут находиться в адсорбированном виде бактерии и вирусы, оставаясь, таким образом, вне воздействия обеззараживающих средств.

8.2 Хлорирование воды

Для обеззараживания воды хлорированием на водоочистных комплексах используют хлорную известь, хлор и его производные, под действием которых бактерии, находящиеся в воде, погибают в результате окисления веществ, входящих в состав протоплазмы клеток. Хлор действует и на органические вещества, окисляя их.

Для качественного хлорирования необходимо хорошее перемешивание, а затем не менее чем 30-минутный (при совместном хлорировании и аммонизации 60-минутный) контакт хлора с водой прежде, чем вода поступит к потребителю. Контакт может происходить в резервуаре фильтрованной воды или в трубопроводе подачи воды потребителю, если последний имеет достаточную длину без водоразбора.

Дозу хлора устанавливают технологическим анализом из расчета, чтобы в 1 л воды, поступающей к потребителю, оставалось 0,3...0,5 мг хлора, не вступившего в реакцию (остаточного хлора), который является показателем достаточности принятой дозы хлора. При этом условии доза хлора при хлорировании фильтрованной воды обычно составляет 2...3 мг/л в зависимости от ее хлоропоглощаемости, а при хлорировании подземной воды – 0,7...1 мг/л. При выключении на промывку или ремонт одного из резервуаров фильтрованной воды, когда не обеспечивается необходимое время контакта воды с хлором, доза хлора должна быть увеличена вдвое.

Хлорирование воды осуществляется жидким (газообразным) хлором. На малых водоочистных комплексах (до 3000 м³/сут) допускается применение хлорной извести. При плюсовых температурах и атмосферном давлении хлор представляет собой газ зеленовато-желтого цвета с удушливым запахом и плотностью, значительно большей, чем плотность воздуха (в 1,5...2 раза в зависимости от температуры). При повышении давления (при плюсовых температурах) хлор переходит в жидкое состояние. В таком виде его перевозят и хранят в специальных стальных емкостях (при давлении 0,6...1,0 МПа).

В настоящее время заводы по производству хлора поставляют хлор в основном в баллонах двух типов: Е-24 вместимостью до 25...30 кг жидкого хлора и Е-54 с содержанием хлора до 100 кг. На крупные водоочистные комплексы производительностью более 100 тыс. м³/сут хлор доставляют

обычно в специальных железнодорожных цистернах вместимостью до 48 т жидкого хлора, а хранят его в емкостях, которые в зависимости от размеров вмещают от 700 до 3000 кг жидкого хлора. Хлорное хозяйство должно обеспечивать прием, хранение, испарение жидкого хлора, добавление газообразного хлора с получением хлорной воды.

Хлорное хозяйство располагают в отдельно размещаемых хлораторных, где сблокированы расходный склад хлора, испарительная и хлордозаторная. Расходный склад хлора можно размещать в отдельных зданиях или вплотную к хлораторной, отделяя его глухой стеной без проемов. Склад хлора в составе хлораторных можно не предусматривать, в этом случае в хлорозаторной разрешается хранение одного баллона жидкого хлора массой не более 70 кг. Хлорозаторные без испарителей, размещаемые в блоке с другими зданиями комплекса или вспомогательными помещениями хлорного хозяйства, отделяют от других помещений глухой стеной без проемов и оборудуют два выхода наружу, причем один из них должен иметь тамбур. Трубопроводы передачи хлорной воды выполняют из поливинилхлорида, резины, полиэтилена высокой плотности и др.

Хлорирование воды является надежным средством, предотвращающим распространение эпидемий, так как большинство патогенных бактерий (бациллы брюшного тифа, туберкулеза и дизентерии, вибрионы холеры, вирусы полимиелита и энцефалита) весьма нестойки по отношению к хлору. Спорообразующих бактерий хлор не уничтожает, что является одним из недостатков этого метода обеззараживания.

Гидролиз хлора происходит в соответствии с уравнением



с образованием хлорноватистой кислоты, которая диссоциирует на соляную кислоту и атомарный кислород (в нейтральной или щелочной среде), обладающий сильными окислительными свойствами. Хлорноватистая кислота диссоциирует с образованием гипохлоритного иона (OCl^-), при этом окислительное воздействие на микроорганизмы оказывает как сама хлорноватистая кислота, так и, главным образом, гипохлоритный ион.

При применении вместо хлора хлорной извести имеет место реакция



Дальнейшая диссоциация хлорноватистой кислоты происходит аналогично описанному выше.

Эффект подавления бактериальной жизни при хлорировании зависит от дозы введенного хлора и продолжительности контакта его с водой. Поэтому хлоропоглощаемость одной и той же воды, равная суммарному расходу

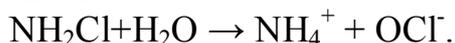
хлора на окисление микроорганизмов, органических и неорганических примесей, - величина переменная, зависящая от дозы введенного хлора, продолжительности контакта, величины рН, температуры воды и др. Очевидно, что доза вводимого хлора должна быть больше величины хлоропоглощаемости на величину остаточного хлора, присутствие которого является гарантией того, что окисление бактерий и органических веществ в воде практически завершено.

На практике в соответствии с качеством исходной воды применяют одно- или двухкратное хлорирование воды. При обработке высокоцветных вод, а также вод, богатых органическими веществами и бактериями, применяют двухкратное хлорирование. При этом хлор в воду дозируется сначала перед камерами хлопьеобразования или осветлителями (предварительное хлорирование), а затем в фильтрованную воду, перед резервуаром чистой воды. Предварительное хлорирование необходимо для окисления органических защитных коллоидов, препятствующих процессу коагуляции, а также окисления гуминовых веществ, обуславливающих цветность воды, с целью экономии коагулянтов, обуславливающих ее обесцвечивание. Доза хлора на предварительное хлорирование значительно выше той, которая вводится в фильтрованную воду, и может достигать до 5 мг/л.

При длительном пребывании питьевой воды перед поступлением к потребителям в резервуарах и водопроводах (более 1,5 ч) для продления бактерицидного действия хлора, а также для предотвращения хлорфенольных запахов, в воду, кроме хлора, вводят также и аммиак. *Введение аммиака*, кроме того, сокращает расход хлора и в ряде случаев улучшает вкус воды. При взаимодействии хлорноватистой кислоты (образовавшейся при хлорировании воды) с аммиаком получаются монохлорамины:



которые, гидролизуясь, образуют сильный окислитель - гипохлоритный ион:

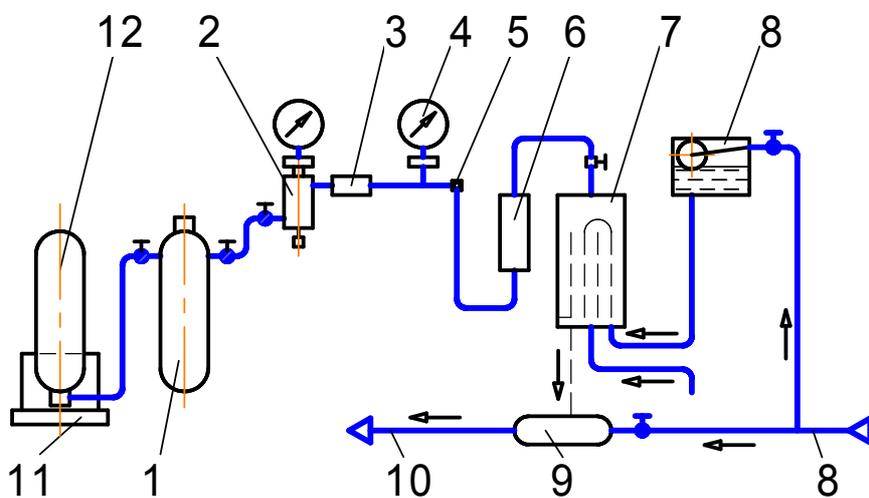


Гидролиз хлораминов протекает довольно медленно, поэтому в первое время окислительное действие хлораминов ниже, чем хлора, но длительность бактериального действия хлораминов значительно больше, в связи с чем и применяют аммонизацию воды перед длительным ее пребыванием в резервуарах, водоемах и сети. Соотношение доз хлора и аммиака зависит от качества исходной воды. Обычно оптимальной, обеспечивающей

образование монохлораминов, является доза аммиака в пять-шесть раз меньше дозы хлора.

Аммиачное хозяйство организуют аналогично хлорному и располагают в отдельных помещениях. Аммиак хранят в расходном складе в баллонах или контейнерах. Ввод аммиака проводят в фильтрат при наличии фенолов - за 2...3 мин до ввода хлора.

Для дозирования в воду хлора, аммиака применяют вакуумные газодозаторы системы ЛОНИИ-100 (рисунок 8.1) [1]. Из баллонов, установленных на специальные весы (для контроля за расходом хлора), жидкий хлор передается в промежуточный баллон, где происходит его испарение и отделение загрязняющих хлор примесей. Далее уже газообразный хлор проходит через фильтр со стекловатой (для окончательной очистки хлор-газа) и через понижающий давление редуктор. Степень понижения давления фиксируется двумя манометрами, установленными до и после редукционного клапана. С помощью диафрагмы создается перепад давлений, который служит импульсом для работы измерителя работы хлора. Затем хлор, поступая в смеситель, смешивается с водопроводной водой, образуя хлорную воду, которая засасывается эжектором и отводится по - назначению.



1 – промежуточный баллон; 2 – фильтр со стекловатой; 3 – редукционный клапан для снижения давления хлор-газа; 4 – манометр; 5 – измерительная диафрагма; 6 – ротаметр; 7 – смеситель; 8 – трубопровод и устройство для подачи воды; 9 – эжектор, создающий разрежение в хлораторе; 10 – отвод хлорной воды на дозирование; 11 – весы; 12 – баллон с хлором.

Рисунок 8.1 – Вакуумный хлоратор

Учитывая, что хлор является отравляющим газом, при проектировании хлораторных установок следует предусматривать необходимые меры, обеспечивающие безопасность обслуживающего персонала.

К числу этих мер относятся: наличие двух выходов из хлораторной, расположение хлораторной на первом этаже; наличие приточно-вытяжной вентиляции с устройством вытяжки в наиболее низкой части хлораторной в месте, противоположном от входа в хлораторную; устройство электроосвещения с газозащитной герметичной аппаратурой; наличие тамбура с размещением в нем спецодежды и противогазов, а также устройств для включения и выключения вентиляции и освещения.

8.3 Электролизные установки для обеззараживания воды

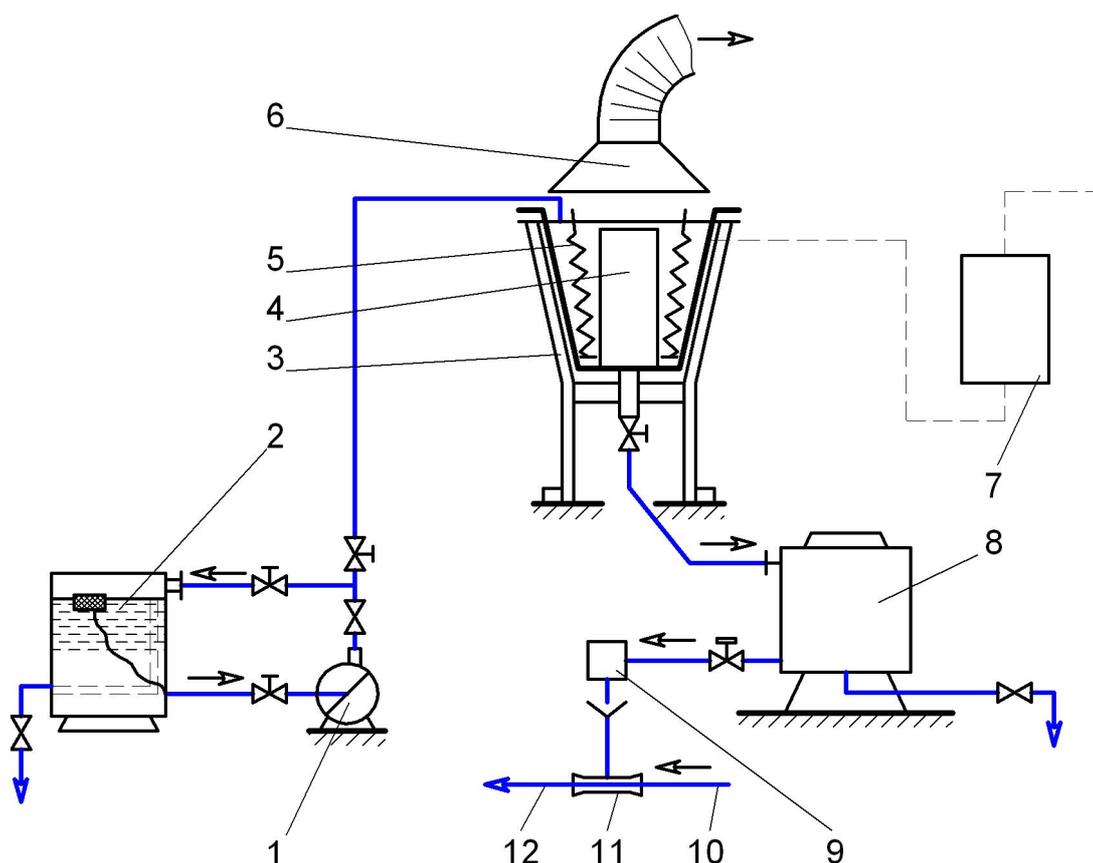
Необходимость соблюдения особых мер предосторожности при транспортировке и хранении токсичного хлора является недостатком метода хлорирования воды. Этот недостаток особенно ощутим в нашей стране при обширности ее территории, когда хлор приходится перевозить на большие расстояния от заводов-поставщиков. Опасность утечки хлора на складах водоочистных комплексов, расположенных вблизи населенных пунктов, во многих случаях препятствует применению этого метода обеззараживания воды. Использование хлорной извести и гипохлорита кальция технически просто, но дорого для крупных водоочистных комплексов.

Одним из наиболее перспективных способов обеззараживания питьевых вод на водоочистных комплексах с суточным расходом хлора до 50 кг является использование гипохлорита натрия (NaClO), получаемого на месте потребления путем электролиза растворов поваренной соли или минерализованных вод, содержащих не менее 20 мг/л хлоридов. Электрохимический способ получения гипохлорита натрия основан на получении хлора и его взаимодействии со щелочью в одном и том же аппарате – электролизере.

В настоящее время в нашей стране серийно выпускается унифицированный ряд непроточных электролизных установок типа ЭН производительностью от 1 до 100 кг активного хлора в сутки. Для небольших водоочистных установок рекомендуются электролизеры ВИЭСХ (0,1...0,2 кг/сут хлора), а также электролизеры ЭН – 1 и ЭН – 5 производительностью 1 и 5 кг активного хлора в сутки. При необходимости можно осуществлять централизованное получение гипохлорита натрия на одном из пунктов с последующей доставкой его к отдельным потребителям. В этом случае могут

применяться установки ЭН – 25 или ЭН – 100 производительностью 25 и 100 кг активного хлора в сутки. Количество электролизеров должно быть не более 3, из которых один резервный.

Электролизная установка непроточного типа (рисунок 8.2) состоит из следующих основных узлов: бака для растворения соли, электролизера с зонтом вытяжной вентиляции, бака-накопителя гипохлорита натрия, выпрямительного агрегата и элементов автоматики.



1 – насос; 2 – растворный бак соли; 3 – электролизер; 4 – кассета с графитовыми электродами; 5 – трубки холодильников; 6 – зонт вытяжной вентиляции; 7 – блок автоматики; 8 – бак-накопитель гипохлорита натрия; 9 – дозатор; 10 – подвод воды к эжектору 11; 12 – отвод воды от эжектора 11.

Рисунок 8.2 – Электролизная установка непроточного типа

Установка работает следующим образом. В растворный бак загружают поваренную соль, заливают воду и с помощью насоса перемешивают до получения насыщенного (280...300 г/л) раствора поваренной соли. Затем раствор с помощью насоса передают в электролизер, где разбавляют

водопроводной водой до рабочей концентрации (100...200 мг/л). Готовый раствор сливают в бак-накопитель, откуда дозируют в обрабатываемую воду.

Отечественная промышленность серийно выпускает установки прямого электролиза «Поток» с анодами из диоксида рутения и катодами из титана, которые чередуются с зазором между пластинами 3 мм. Установка состоит из электролизера, блока питания и замкнутого кислотного контура. Электролизер выполнен в форме параллелепипеда, внутри которого размещен пакет электродов. Кислотный контур предназначен для периодической промывки аппарата 3...5%-ным раствором кислоты для борьбы с катодным солеотложением. При одноразовом проходе под давлением обрабатываемой воды снизу вверх в межэлектродном пространстве электролизера обеспечивается ее обеззараживание, величина остаточного хлора в воде через 30 мин контакта составляет 0,3...0,5 мг/л. Как показали расчеты и практика, обеззараживание подземных вод предпочтительно прямым электролизом в рамках применимости данного метода.

8.4 Озонирование воды

Одним из наиболее сильных окислителей, уничтожающих бактерии, споры и вирусы, является озон. Несомненным преимуществом озонирования является и то, что одновременно с обеззараживанием происходит обесцвечивание воды, а также ее дезодорация и улучшение вкусовых качеств. Озон не изменяет природные свойства воды, так как его избыток (непрореагировавший озон) через несколько минут превращается в кислород.

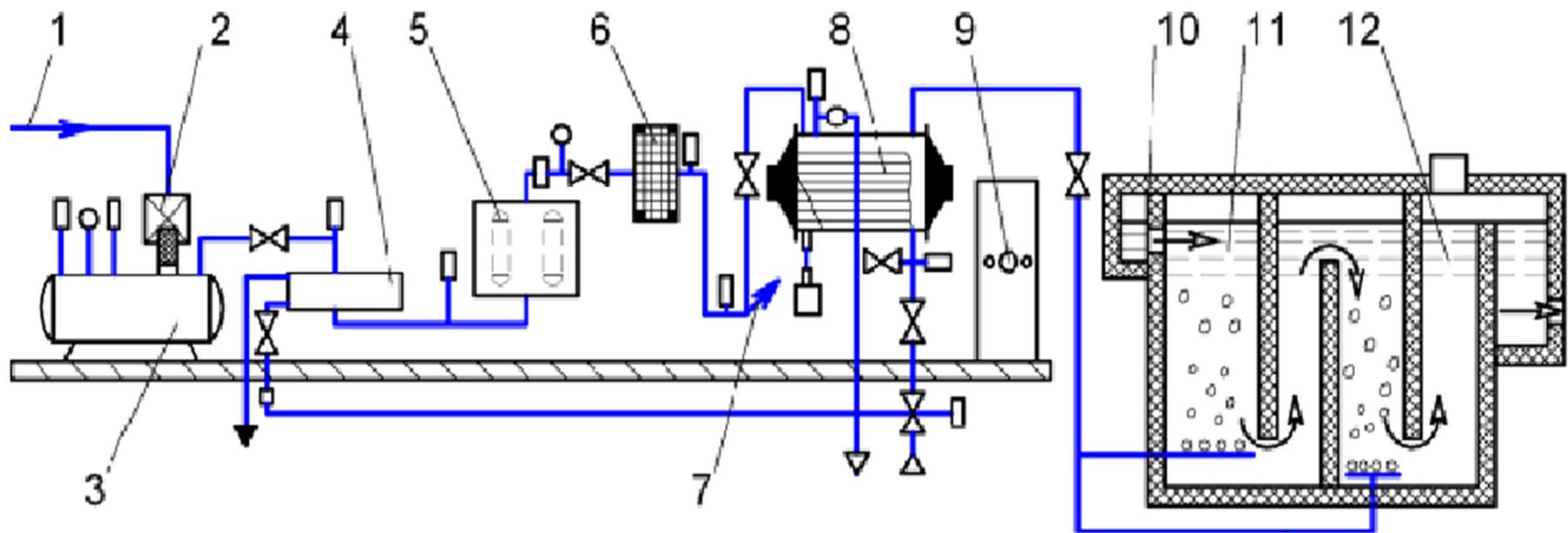
Озон O_3 , используемый для дезинфекции воды, получают из атмосферного воздуха в аппаратах, называемых озонаторами, в результате воздействия на воздух «тихого» (т.е. рассеянного, без искр) коронного электрического разряда, сопровождающегося выделением озона. Общая схема установки по озонированию показана на рис. 8.3. Генератор озона представляет собой горизонтальный цилиндрический аппарат (как один из вариантов) с вмонтированными в него трубками из нержавеющей стали по типу теплообменника. Внутри каждой стальной трубы помещена стеклянная трубка с небольшой (2...3 мм) кольцевой воздушной прослойкой, являющейся разрядным пространством. Внутренняя поверхность стеклянных трубок имеет графито-медное или алюминиевое покрытие. Стальные трубки являются одним из электродов, а покрытия на внутренних стенках стеклянных трубок - другим. К стальным трубкам подводят электрический переменный ток напряжением 8...10 кВ, а покрытия на стеклянных трубках

заземляют. При прохождении электрического тока через разрядное пространство происходит *разряд коронного типа*, в результате которого образуется озон. Предварительно осушенный и очищенный воздух проходит через кольцевое пространство и таким образом озонируется, т. е. образуется озono-воздушная смесь. Стеклоянные трубки являются диэлектрическим барьером, благодаря чему *разряд получается «тихим»*, т. е. рассеянным без образования искр. При этом до 90% электроэнергии превращается в теплоту, которую отводит от озонатора циркулирующая в межтрубном пространстве аппарата охлаждающая вода.

Подача в озонаторы кислорода увеличивает выход озона в 2...2,5 раза по сравнению с подачей воздуха, но требует строительства установок для получения кислорода. Воздух, используемый в озонаторах, должен быть предварительно освобожден от влаги и пыли. Даже следы влаги, попадая в разрядное пространство аппарата, вызывают появление искрового разряда, который значительно снижает показатели работы озонатора – уменьшается выход озона и примерно в 4 раза возрастает расход электроэнергии (по сравнению с подачей сухого воздуха). Кроме того, присутствие следов влаги делает озон весьма агрессивным к деталям озонатора, трубам и арматуре. Для извлечения пыли воздух пропускают через матерчатые фильтры специальных конструкций, а для удаления влаги устанавливают адсорберы, загружаемые обычно силикагелем.

При сушке воздуха выделяется теплота. Чтобы в озонатор не попал слишком теплый воздух, его подвергают охлаждению. С этой целью воздух пропускают через теплообменник либо охлаждают в самом адсорбере путем подачи воды через змеевик, располагаемый непосредственно в силикагеле.

Озон (озоно-воздушную смесь) вводят в воду либо через эжекторы либо через сеть пористых труб или распределительных каналов, укладываемых по дну контактного резервуара. Распределительные каналы перекрывают фильтросными пластинами.



1 – подача воздуха от компрессора; 2 – воздушный фильтр; 3 – теплообменник; 4 – водомаслоотделитель; 5 – теплообменники для охлаждения воздуха; 6 – адсорбер с силикагелем; 7 – отвод избыточной влаги; 8 – озонатор; 9 – блок автоматики; 10 и 12 – подача и отвод обрабатываемой воды; 11 – контактная камера

Рисунок 8.3 – Схема установки для озонирования воды

Доза озона зависит от целей озонирования воды. Если озон вводят в фильтрованную воду (после ее предварительного коагулирования) только для обеззараживания, то дозу озона принимают равной 1...3 мг/л, для подземной воды – 0,75...1 мг/л; при введении озона для обесцвечивания и обеззараживания воды доза озона может достигать до 4 мг/л. Продолжительность контакта обеззараживаемой воды с озоном принимается равной 5...12 мин.

Озон очень сильный окислитель, его окислительный потенциал составляет 2,06 В. Патогенные микроорганизмы уничтожаются озоном в 15 – 20 раз быстрее, а споровые формы бактерий – в 300 – 600 раз быстрее, чем хлором.

Механизм обеззараживания воды озоном основан на его способности инактивировать сложные органические вещества белковой природы, содержащиеся в животных и растительных организмах

Чистый озон взрывоопасен. Он не взрывается, если его концентрация в озонно – воздушной смеси не превышает 10%, то есть 140 г/м³. Озон токсичен и может поражать органы дыхания. ПДК озона в воздухе помещений, где находятся люди, составляет 0,0001 мг/л.

Для обеззараживания воды доза озона назначается в соответствии с ее температурой и рН, а также содержанием в ней органических веществ.

В ряде случаев озонирование является универсальным методом водообработки, так как кроме обеззараживания вода дезодорируется и разлагаются органические вещества, обуславливающие цветность воды, улучшается процесс коагулирования примесей. Концентрация остаточного озона после выхода воды из контактной камеры должна быть не более 0,1 – 0,3 мг/л. Передозировка озона неопасна, так как через короткое время он превращается в кислород.

Отечественная промышленность выпускает низкочастотные (50-200 Гц) озонаторы, работающие на токе промышленной частоты и высокочастотные (400-10000 Гц) - более компактные и менее металлоемкие. Завод «Курганхиммаш» серийно выпускает [15] промышленные озонаторы марки «П» с напряжением питания 380 В, частотой питающего напряжения 50 Гц, с производительностью по озону от 0,32 до 25,5 кг (табл. 8.1).

Таблица 8.1

Характеристики промышленных озонаторов ООО «Курганхиммаш»

Марка озонатора	Производительность по озону, кг/час	Номинальный расход воздуха, $\text{нм}^3/\text{час}$	Расход воды на охлаждение, $\text{м}^3/\text{час}$	Установленная мощность, кВт
П-13	0,32	16	1,5	6,5
П-31	0,76	38	4	13
П-60	1,5	75	7	30
П-90	2,7	135	18	45
П-120	3,6	180	20	60
П-160	4,8	240	25	100
П-198	6,0	300	36	130
П-270	8,1	405	48	170
П-379	11,4	570	64	230
П-514	15,4	770	82	300
П-647	19,4	970	97	360
П-850	25,5	1275	125	450

Примечание: Возможная концентрация озона на выходе из озонаторов составляет $30 \text{ г}/\text{нм}^3$; давление воздуха на входе $0,07 \text{ МПа}$; расход электроэнергии на 1 кг озона – $17\text{-}20 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$.

8.5 Обеззараживание воды бактерицидными лучами

Для обеззараживания природных вод можно применять бактерицидное излучение при условии, если *Coli*-индекс исходной воды не более $1000 \text{ ед}/\text{л}$, содержание железа до $0,3 \text{ мг}/\text{л}$, мутность до $2 \text{ мг}/\text{л}$. Обеззараживание воды бактерицидными лучами имеет ряд преимуществ перед хлорированием.

Природные вкусовые качества и химические свойства воды не изменяются. Бактерицидное действие лучей протекает во много раз быстрее, чем действие хлора; после облучения воду сразу можно подавать потребителям. Бактерицидные лучи уничтожают не только вегетативные виды бактерий, но и спорообразующие. Эксплуатация установок для обеззараживания воды бактерицидными лучами проще, чем хлорного хозяйства.

Установлено [1], что наибольшим бактерицидным действием обладают ультрафиолетовые лучи с длиной волны от 295 до 200 мкм . Эту область ультрафиолетового излучения называют бактерицидной. Максимум

бактерицидного действия располагается около длины волны в 260 мкм. Процесс отмирания бактерий описывается уравнением

$$p = p_0 \exp\left(-\frac{E\tau}{k}\right), \quad (8.1)$$

где p – число бактерий в единице объема, оставшихся живыми после бактерицидного облучения; p_0 – начальное число бактерий в единице объема; E – интенсивность потока бактерицидных лучей, Вт/м²; τ – продолжительность облучения, с; $k = 2500$ – коэффициент сопротивляемости бактерий.

Эффект обеззараживания воды зависит от произведения интенсивности бактерицидного облучения E на продолжительность облучения T , т.е. от количества затраченной бактерицидной энергии. Это означает, что один и тот же эффект может быть получен при малой интенсивности облучения, но большой продолжительности его и, наоборот, при большой интенсивности облучения и малой продолжительности.

При определении требуемого количества бактерицидной энергии необходимо учитывать ее поглощение при прохождении потока лучей через слой воды. Интенсивность потока лучистой энергии в толще поглощающего оптически однородного вещества (в мкВт/см²) изменяется по закону Ламберта—Бугера

$$E = E_0 \exp(-\alpha x), \quad (8.2)$$

где E_0 — интенсивность потока лучистой энергии, поступающей на поверхность вещества, мкВт/см²; α — коэффициент поглощения, м⁻¹; x — толщина слоя поглощающего вещества, м.

Коэффициент поглощения существенно зависит от состава воды и для различных источников водоснабжения меняется в широких пределах. Наибольшее влияние на коэффициент поглощения оказывают цветность воды, ее мутность и содержание железа. Жесткость, хлориды, сульфаты, аммиак, нитриты и нитраты в обычных концентрациях практически не влияют на поглощение бактерицидного излучения.

При обеззараживании бактерицидными лучами неочищенных мутных, цветных вод или вод с повышенным содержанием железа коэффициент поглощения оказывается настолько большим, что бактерицидный метод становится экономически нецелесообразным, а с санитарной точки зрения —

ненадежным. Поэтому применение бактерицидных лучей рекомендуется только для обеззараживания воды, прошедшей очистку, или для подземных вод, не требующих очистки, но нуждающихся в обеззараживании в профилактических целях.

Большая разница в значениях коэффициента поглощения различных вод указывает на то, что наиболее правильным было бы его экспериментальное определение в каждом конкретном случае проектирования установок для обеззараживания воды. Если такая возможность по каким-либо причинам исключается, можно воспользоваться эмпирической формулой

$$\alpha = \frac{Ц+П+10(C_{Fe}-0,1)}{100}, \quad (8.3)$$

где Ц — цветность воды, град; П — эмпирическая величина, учитывающая влияние мутности воды, равная 7 для вод цветностью до 20 град и 9 для вод цветностью 20 ... 50 град; C_{Fe} — концентрация железа, мг/л.

Микроорганизмы, находящиеся в воде, имеют различную степень сопротивляемости действию бактерицидных лучей, и значение коэффициента k зависит от вида бактерий. Коэффициент сопротивляемости различных видов вегетативных и патогенных бактерий *Coli*, равен приблизительно 2500; это значение и принимают при расчетах необходимого количества бактерицидной энергии для обеззараживания. При этом эффект обеззараживания воды, характеризуемый отношением p/p_0 , подсчитывают по отмиранию бактерий группы *Coli* (коли).

При определении необходимого количества бактерицидной энергии следует учитывать ее поглощение при прохождении потока лучей через слой воды: для бесцветных, не требующих обезжелезивания подземных вод, получаемых с глубоких горизонтов, — $0,1 \text{ см}^{-1}$; для родниковой, грунтовой, подрусловой и инфильтрационной воды — $0,15 \text{ см}^{-1}$; для воды поверхностных источников водоснабжения, прошедшей очистку на очистных сооружениях, — $0,2 \dots 0,3 \text{ см}^{-1}$.

В последнем случае рекомендуемое значение коэффициента поглощения принято с запасом, учитывая возможные случайные отклонения показателей качества воды по мутности и цветности от требований ГОСТ 2874 – 82 «Вода питьевая».

Расчетный поток бактерицидной энергии рекомендуется рассчитывать по формуле

$$F_p = \frac{V_{\text{ж}} \alpha k l g \left(\frac{p}{p_0} \right)}{1563,5 \eta_0 \eta_{\text{п}}}, \quad (8.4)$$

где $V_{\text{ж}}$ – расход обеззараживаемой воды, м³/ч; α – коэффициент поглощения, см⁻¹; k – коэффициент сопротивляемости бактерий, принимаемы равным 2500 мкВт·с/см²; p_0 – коли-индекс воды до облучения; p – коли-индекс воды после облучения, принимаемый согласно ГОСТ 2874 – 82 не более 3; η_0 – коэффициент использования бактерицидного потока, учитывающий поглощение лучей в слое воды, принимаемый равным 0,9; $\eta_{\text{п}}$ – коэффициент использования бактерицидного потока, учитывающий поглощение лучей отражателем (в аппаратах с непогруженным источником) или в кварцевых чехлах (в аппаратах с погруженными источниками). Значение коэффициента $\eta_{\text{п}}$ зависит от типа аппарата; для предварительных расчетов он может быть принят равным 0,9.

Необходимое количество бактерицидных ламп n определяется по формуле $n = F_p / F_{\text{л}}$, где $F_{\text{л}}$ – расчетный бактерицидный поток одной лампы (таблица 8.2).

Расход электроэнергии, Вт·ч/м³, на обеззараживание воды

$$S = \frac{Nn}{V_{\text{ж}}}, \quad (8.5)$$

где N – потребляемая лампой мощность, Вт (см. таблицу 8.2).

Наиболее распространенными источниками бактерицидного излучения являются ртутно-кварцевые лампы высокого давления ПРК и аргоно-ртутные лампы низкого давления РКС-2,5. Ртутно-кварцевые лампы высокого давления (примерно 0,05 ...0,1 МПа) с температурой оболочки при горении лампы до 250...300°С являются мощными источниками видимого света и ультрафиолетовых лучей с максимумом излучения линий 365...3666,3 мкм. Указанные в табл. 8.2 основные расчетные параметры ртутно-кварцевых (ПРК и РКС) и аргоно-ртутных (БУВ) ламп относятся к концу расчетного срока их службы, т. е. после 4500...5000 ч горения. Бактерицидный поток новых ламп на 30% выше.

Таблица 8.2 - Параметры бактерицидных ламп

Тип лампы	Бактерицидный поток F _л , Вт	Потребляемая мощность, Вт
УВ – 30	2	30
БУВ – 60П	6,5	60
ПРК – 7	35	1000
РКС – 2,5	-	6000

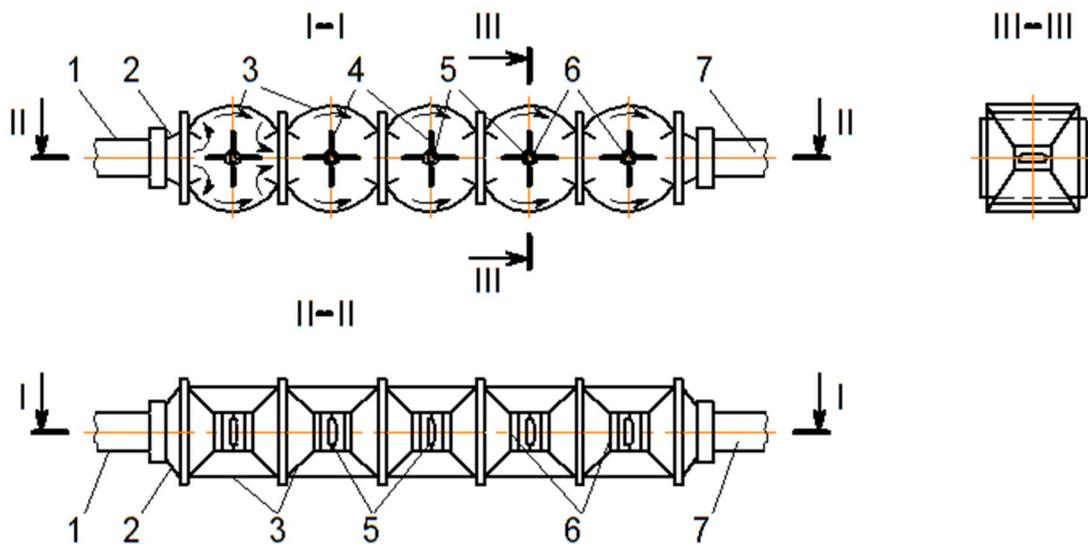
Небольшая мощность выпускаемых промышленностью аргоно-ртутных ламп позволяет применять их только в установках малой производительности, несмотря на их экономичность. Ртутно-кварцевые лампы высокого давления, хотя и менее экономичные, чем аргоно-ртутные, применяют для обеззараживания большого количества воды с незначительным бактериальным загрязнением. В этих случаях обеззараживание воды облучением даже с использованием ртутно-кварцевых ламп высокого давления более экономично по сравнению с хлорированием. В отечественной практике применяют несколько типов установок для обеззараживания воды бактерицидными лучами, разработанных в НИИ КВОВ Академии коммунального хозяйства [1].

Установка типа ОВ-1П предназначена для обеззараживания воды на небольших объектах. При обеззараживании большого количества воды включают несколько аппаратов параллельно. Установка ОВ-1П состоит из корпуса и одной бактерицидной лампы БУВ-60П, размещенной в кварцевом цилиндрическом чехле. Пусковое устройство к бактерицидной лампе крепят непосредственно к корпусу установки. Вода поступает в аппарат через нижний входной патрубок. Внутри аппарата имеется спираль, которая сообщает воде вращательное движение, способствующее хорошему перемешиванию потока. Омывая кварцевый чехол, вода подвергается равномерному облучению и обеззараживается. Потери напора в камере установки при расчетном расходе 3 м³/ч составляют 0,2 м вод. ст.. Установку монтируют в помещении с температурой воздуха не ниже +5°С вертикально на трубопроводе за насосом или непосредственно у водопотребителя. Для ее работы требуется переменный ток напряжением 220 В. Необходимо периодически (1...2 раза в месяц) очищать кварцевый чехол от осаждающегося на нем осадка. Очистку производят без выключения

установки путем нескольких возвратно – поступательных движений спирали, передвигаемой с помощью рукоятки.

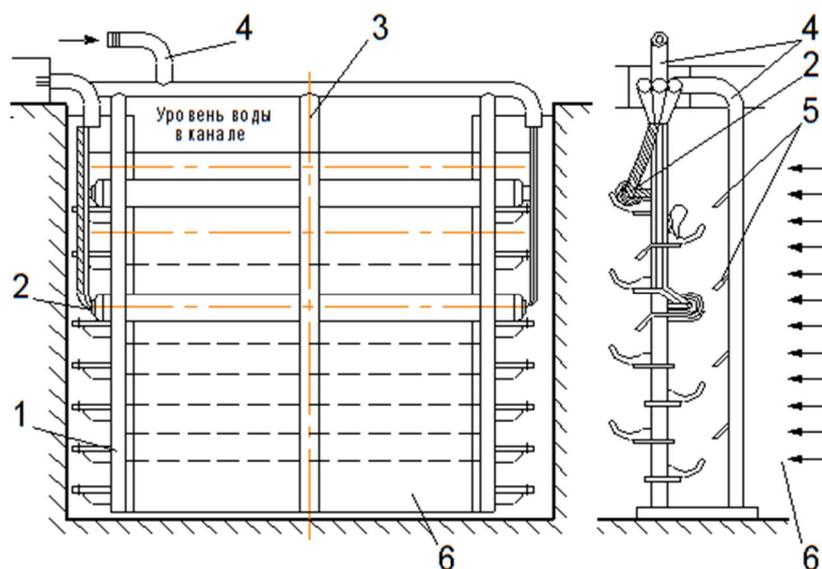
Установка типа ОВ – 3Н также предназначена для обеззараживания воды на водопроводах небольшой мощности. Она состоит из корпуса в виде прямоугольной камеры с тремя лотками, крышки корпуса, в которой размещены бактерицидные лампы и шкаф управления. Установка оборудована бактерицидными лампами БУВ – 60П и рассчитана на производительность до 8,0 м³/ч. При обеззараживании большого количества воды включают несколько установок параллельно. Вода в безнапорной установке ОВ – 3Н движется самотеком, через приемную камеру, дырчатую перегородку и дальше проходит по лоткам, дважды меняя направление. При движении воды по лоткам поток воды перемешивается, подвергаясь равномерному воздействию бактерицидного излучения ламп. Потеря напора в установке при расчетном расходе воды 8 м³/ч составляет 0,10...0,15 м. Установку монтируют в помещении с температурой воздуха не ниже +5°С и только в горизонтальном положении. Для ее работы требуется переменный ток напряжением 220 В.

Установка типа ОВ-АКХ-1 (рисунок 8.4) предназначена для обеззараживания воды бактерицидными лучами на централизованных водопроводах средней производительности. Установка состоит из двух основных частей: технологической и электрической. В первую входят секции установки, включающие в себя ряд (от двух до пяти) последовательно соединенных камер. Вторая — состоит из шкафа управления и ящика сигнализации. Каждая камера представляет собой литую конструкцию цилиндрической формы с шестью внутренними радиальными перегородками, обеспечивающими интенсивное перемешивание воды во время облучения. В центральной части каждой камеры в кварцевом цилиндрическом чехле размещена ртутно-кварцевая лампа типа ПРК-7. Производительность установки в зависимости от числа камер составляет от 30 до 150 м³/ч. Обеззараживаемая вода поступает через входной патрубок через последовательно расположенные камеры.



1,7 – входной и выходной патрубки; 2 – переходные патрубки; 3 – бактерицидные камеры; 4 – струенаправляющие перегородки; 5 – ультрафиолетовые излучатели; 6 – кварцевые чехлы

Рисунок 8.4 – Бактерицидная установка ОВ-АКХ-1



1 – металлическая рама с кронштейнами; 2 – блоки с бактерицидными лампами РКС-2,5; 3 – металлические пластины; 4 – трубопровод напорной воды для отмывки чехлов; 5 – промывные сопла; 6 – канал подачи обрабатываемой воды.

Рисунок 8.5 – Бактерицидная установка ОВ-3П-РКС

Безнапорная установка ОВ-ЗП-РКС (рисунок 8.5) рассчитана на расход $3000 \text{ м}^3/\text{ч}$ и более. Она размещается в канале в виде рам-кассет, на которых закреплены блоки с лампами РКС-2,5. В кассеты монтируются несколько ламп, защищенных кварцевыми цилиндрическими чехлами. Чтобы обеспечить турбулентный режим потока воды и хорошее перемешивание в канале во время облучения, лампы располагают в шахматном порядке. При таком размещении ламп обеспечивается высокий коэффициент использования бактерицидного потока. Канал, оборудованный кассетами, сверху перекрыт съемными крышками. Рядом с каналом располагается пульт управления с пусковой аппаратурой к лампам.

Опыт эксплуатации установок для обеззараживания воды бактерицидными лучами показывает, что этот метод обеспечивает надежную дезинфекцию воды. Эксплуатационные расходы на обеззараживание воды облучением не превышают эксплуатационных затрат на хлорирование, а на водопроводах, использующих в качестве источников водоснабжения подземные, родниковые или подрусовые воды, обеззараживание воды облучением дешевле в 2-3 раза по сравнению со стоимостью обеззараживания воды путем хлорирования.

Расход электрической энергии на обеззараживание воды из подземных источников водоснабжения облучением не превышает $10 \dots 15 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$. Расход электрической энергии на облучение воды из открытых источников водоснабжения, прошедший обработку на водоочистных сооружениях, составляет до $30 \text{ Вт}\cdot\text{ч}/\text{м}^3$.

Недостатком рассматриваемого метода обеззараживания является отсутствие оперативного метода контроля эффекта обеззараживания (в отличие от хлорирования — по остаточному хлору). Кроме того, метод облучения непригоден для обеззараживания мутных вод.

9 Доочистка водопроводной воды микро-ультрафильтрацией

Микрофильтры предназначены для осветления воды с размерами частиц дисперсной фазы менее 10 мкм , а если точнее, с размерами частиц от $0,1$ до 10 мкм . Для отделения еще более мелких частиц используются мембранные ультрафильтры. В отличие от обычного процесса фильтрации, где на разделяющей перегородке образуется слой осадка твердой фазы, при микро- и ультрафильтрации через пористые полимерные мембраны образуется не осадок, а концентрат с повышенным содержанием дисперсной

фазы, остающейся во взвешенном состоянии. Это достигается непрерывным движением осветляемой суспензии относительно мембран.

К достоинствам процесса микрофльтрации относится то, что он осуществляется при сравнительно невысоких давлениях (до 0,4 МПа), позволяет выделять очень мелкую твердую фазу (с частицами до 0,1 мкм) и обеспечивает достаточно высокую удельную производительность (проницаемость) по фильтрату (до $0,1 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$).

Недостаток процесса микрофльтрации заключается в возможном проникновении частиц в пористую фильтрующую перегородку со снижением ее проницаемости.

В разработке микрофльтрационных установок есть два основных и независимых друг от друга момента (две проблемы): подбор соответствующих фильтрующих элементов и создание из них аппаратов или отдельных фильтровальных модулей с последующей компоновкой их в блоки с необходимым вспомогательным оборудованием.

9.1 Типы фильтрующих элементов и конструкции микрофльтров

Фильтрующие элементы микрофльтров бывают трех типов:

- плоскокамерные;
- трубчатые;
- рулонные или спиральные.

Плоскокамерный фильтрующий элемент состоит из двух мембран, уложенных по обе стороны плоского пористого материала. Такие элементы komponуются в аппараты (рисунок 9.1), напоминающие по конструкции фильтр-прессы [11]. Пакет плоскокамерных фильтрующих элементов зажимается между двумя фланцами и стягивается болтами. Разделяемая суспензия (или коллоидный раствор) проходит последовательно вдоль всех фильтрующих элементов, концентрируется и отводится из аппарата. Прошедший через мембраны фильтрат удаляется через слои пористого материала в радиальном направлении.

Основной недостаток аппаратов с плоскокамерными фильтрующими элементами – малая удельная поверхность мембран по отношению к объему аппарата ($60\text{-}300 \text{ м}^2/\text{м}^3$). Такие аппараты имеют невысокую производительность.

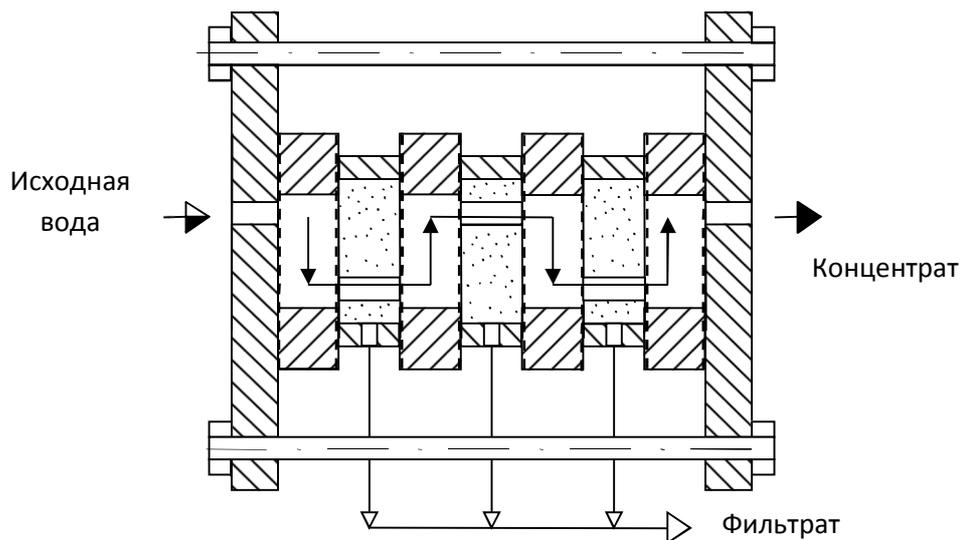


Рисунок 9.1 – Схема плоскокамерного мембранного микрофилтра

Наиболее часто применяются *трубчатые фильтрующие элементы* (ТФЭ). Они представляют собой сменный и обычно неразъемный узел аппарата, состоящий из полупроницаемой мембраны, подложки и дренажного каркаса.

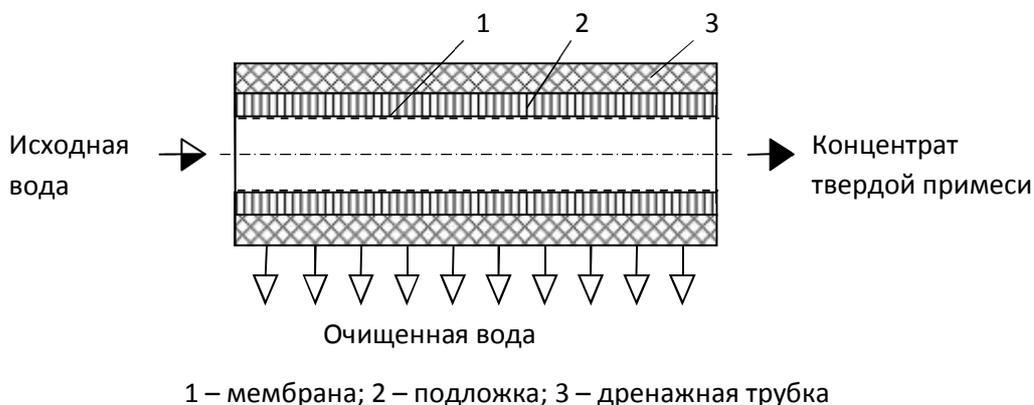


Рисунок 9.2 – Схема трубчатого фильтрующего элемента с мембраной

Дренажный каркас выполняется из трубки 3, обеспечивающей прочность элемента и отвод фильтрата, и из мелкопористой подложки 2, исключающей вдавливание мембран в дренажные каналы трубки под воздействием рабочего давления смеси.

Известны три типа трубчатых фильтрующих элементов: с полупроницаемой мембраной на внутренней поверхности трубки (рисунок 9.2), на наружной поверхности трубки (рисунок 9.3) или с комбинированным ее расположением (рисунок 9.4).

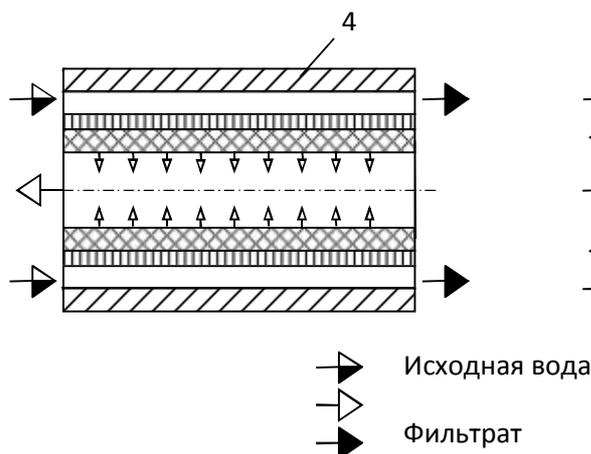


Рисунок 9.3 - Схема ТФЭ с мембраной на наружной стороне трубки

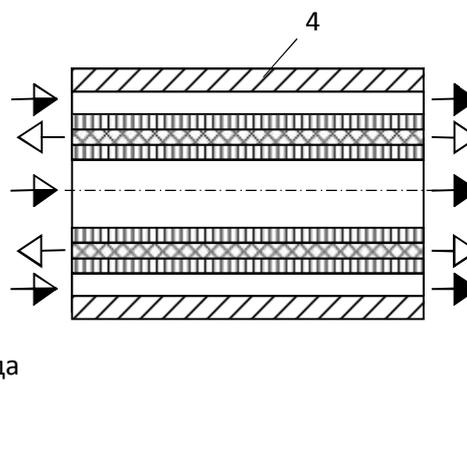


Рисунок 9.4 - Схема ТФЭ с комбинированным расположением мембраны

К пористым трубчатым опорам и подложкам предъявляются следующие требования:

- высокая прочность при небольшой толщине;
- инертность по отношению к разделяемым веществам;
- химическая стойкость;
- гладкость и плотность опорной поверхности для предотвращения продавливания мембран в поры подложки;
- малое гидравлическое сопротивление потоку фильтрата;
- технологичность способа изготовления;
- низкая стоимость исходных материалов.

Первым трем требованиям наиболее полно соответствуют опоры из металлических нержавеющих сеток, тканей, пористых труб, которые используются там, где важны прочность и коррозионная стойкость. Использование хлопковых тканей ограничено температурой, высокими и низкими значениями рН. Стекловолокно – один из самых дешевых, стабильных и инертных материалов, устойчиво в кислых и щелочных средах, при высокой температуре, однако оно мало пластично и плохо сопротивляется истиранию. Эти показатели несколько улучшаются при пропитке стекловолокна смолами.

Подложка должна быть мелкопористой, обладать незначительным гидравлическим сопротивлением потоку фильтрата. Для подложек

используют специальные сорта бумаги или тканей из тонкого синтетического волокна, пропитанные смолами.

Трубчатые фильтрующие элементы с мембраной на внутренней поверхности каркаса имеют целый ряд преимуществ:

- рабочее давление подвергает подложку и опору растяжению, что увеличивает их проницаемость во время работы;
- малая материалоемкость из-за отсутствия напорного корпуса;
- незначительное гидравлическое сопротивление потоку фильтрата в связи с небольшой длиной дренажного канала;
- возможность механической очистки элементов от осадка без их разборки;
- защищенность мембраны от повреждения во время установки ТФЭ в аппарат.

Недостатки у них тоже есть:

- повышенные требования к точности формирования внутреннего диаметра каркаса;
- невозможность осуществления визуального контроля процесса формирования мембран.

Конструкции с мембраной, расположенной на наружной поверхности трубки, обеспечивают возможность получения ТФЭ малых диаметров, что значительно увеличивает удельную рабочую поверхность мембран. Они не

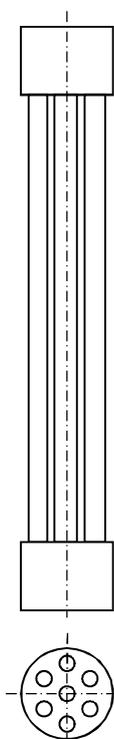


Рисунок 9.5 - Элемент БТМ

требуют соблюдения высокой точности диаметра опорной поверхности каркаса, позволяют осуществлять визуальный контроль процессов формирования, но лишены тех преимуществ, которые свойственны тем же элементам с мембраной внутри каркаса.

ТФЭ с комбинированным расположением мембраны имеют в $1,6 \div 1,8$ раз большую удельную рабочую поверхность, чем описанные выше конструкции. Однако, кроме недостатков, характерных для первых двух видов ТФЭ, в таких конструкциях создаются значительные гидравлические сопротивления из-за большой длины каналов для отвода фильтрата в продольном направлении. Вследствие указанных недостатков, комбинированные конструкции ТФЭ не нашли широкого промышленного применения.

Анализ показывает, что предпочтительно

использовать ТФЭ с полупроницаемой мембраной, расположенной на внутренней поверхности каркаса, так как это позволяет снизить материалоемкость аппаратов.

Сейчас в массовом промышленном исполнении освоены фильтрующие элементы для микрофильтров типа БТМ (рисунок 9.5). Технология их изготовления разработана во Владимирском НПО «Полимерсинтез», «Тасма» (Казань), НПО «Кристалл» (Дзержинск). Такой элемент имеет семь фильтрующих дренажных трубок, выполненных из стеклопластика, пропитанного смолой, и покрытых внутри полимерной мембраной.

Внутренний диаметр трубок 13 мм, длина – 2000 мм. По концам трубки заделаны в пластмассовые бобышки, что позволяет весь фильтрующий элемент герметично устанавливать во фланцевых соединениях или крепить другим способом в основном аппарате. Имеются также сведения о дренажных трубках, выполненных из пористого металла, на внутреннюю поверхность которых нанесена полимерная мембрана.

Основной характеристикой фильтровального элемента является его проницаемость q , то есть объем фильтрата, проходящий через 1 м² фильтрующей поверхности в секунду. Для фильтров типа БТМ каталог дает осредненную величину $q = 14 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Оценим поверхность одного элемента БТМ:

$$F_{\text{эл}} = z \cdot \pi d l = 7 \cdot 3,14 \cdot 0,013 \cdot 2 = 0,571 \text{ м}^2, \quad (9.1)$$

где z – число трубок; d – их внутренний диаметр, м; l – длина трубок, м.

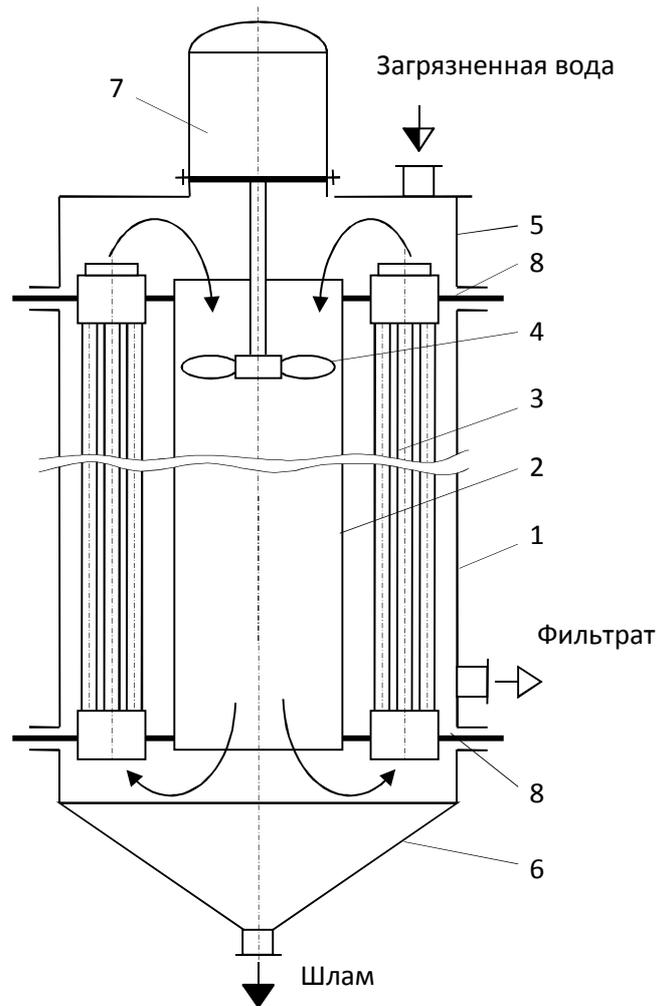
Отсюда производительность одного элемента БТМ по фильтрату

$$V_{\text{ж}} = q F_{\text{эл}} = 14 \cdot 10^{-6} \cdot 0,571 = 8,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3/\text{с} = 28 \text{ л/ч}. \quad (9.2)$$

Данный расчет показывает, что фильтр промышленной производительности должен состоять из большого количества фильтрующих элементов. Компоновка их может быть самой различной.

Рассмотрим принципиальную схему аппарата-модуля небольшой производительности с элементами, имеющими внутреннюю фильтрующую поверхность (рисунок 9.6).

Аппарат состоит из кожуха 1, в трубные решетки которого заделан циркуляционный стакан 2. В этих же трубных решетках устанавливаются уже рассмотренные нами элементы 3 типа БТМ, каждый из которых имеет по семь фильтрующих трубок с внутренним диаметром 13 мм. Элементы 3 герметично уплотняются в трубных решетках резиновыми кольцами с нажимными втулками.



1 – корпус; 2 – циркуляционный стакан; 3 – фильтрующий элемент; 4 – циркуляционная мешалка (винтовая); 5 – крышка; 6 – днище; 7 – электродвигатель; 8 – трубные решетки.

Рисунок 9.6 - Микрофильтр периодического действия

Исходная суспензия подается в аппарат через штуцер в крышке. В нижней части кожух имеет штуцер для отвода фильтрата. В циркуляционном стакане размещена винтовая мешалка, выполняющая роль циркуляционного насоса, непрерывно прокачивающего суспензию через ТФЭ. Концентрат твердой фазы собирается в днище и удаляется через нижний штуцер после достижения его максимально возможной концентрации. Представленный на рисунок 9.6 микрофильтр является аппаратом периодического действия. Его использование целесообразно при малых расходах загрязненной воды.

На примере этой конструкции хорошо видны основные требования к конструкциям микрофильтров:

- большая рабочая поверхность мембран в единице объема аппарата;

- простота сборки и монтажа ввиду необходимости периодической замены мембран;
- жидкость должна равномерно распределяться по поверхности элементов аппарата и иметь достаточно высокую скорость течения, чтобы в пристенном слое фильтрующих элементов не наблюдалось отложение осадка или повышение концентрации твердой фазы (при этом происходит снижение проницаемости);
- кроме того, необходимо выполнение всех требований, связанных с работой аппаратов при повышенных давлениях: обеспечение механической прочности, герметичности и т.д.

Более высокая производительность по очищаемой воде может быть обеспечена при использовании микрофильтрационной установки непрерывного действия, состоящей из нескольких блоков, конструкция которых показана на рисунок 9.7.

Каждый из блоков скомпонован из нескольких пар вертикально расположенных фильтрующих элементов типа БТМ 0,25/1. Эти элементы установлены на коллекторах, а вверху соединены калачами. Коллекторы подсоединяются к нагнетательным и всасывающим патрубкам центробежного насоса. Таким образом, образуется контур циркуляции, препятствующей осаждению твердой фазы и повышению ее концентрации в пристенном слое мембран.

Расположение элементов и простота конструкции крепления их к коллекторам и калачам позволяет осуществлять их быструю замену в случае ухудшения качества фильтрата. Для обеспечения визуального наблюдения за качеством фильтрата фильтрующие элементы закрывают прозрачными колпаками или ПЭ рукавами. Получаемый фильтрат стекает в виде пленки по внешней поверхности фильтрующих трубок в стаканы-сборники, устанавливаемые в нижней части фильтрующих элементов. Верхние калачи имеют патрубки, объединенные в общий коллектор-воздушник. Этот коллектор необходим для отвода воздуха из установки в период ее заполнения.

Эксперименты позволили выявить оптимальные условия работы проточного фильтра и установки: рабочее давление – 0,4 МПа; скорость циркуляции суспензии в фильтрующих трубках 4÷6 м/с (режим движения сточной воды в трубках должен отвечать условию $Re = wd/v_{ж} \geq 50\ 000$). Поток должен быть достаточно турбулизован. При меньших Re снижается

величина пульсационной скорости, направленной по нормали к стенке канала. Это ухудшает условия смывания осадка с фильтрующей поверхности.

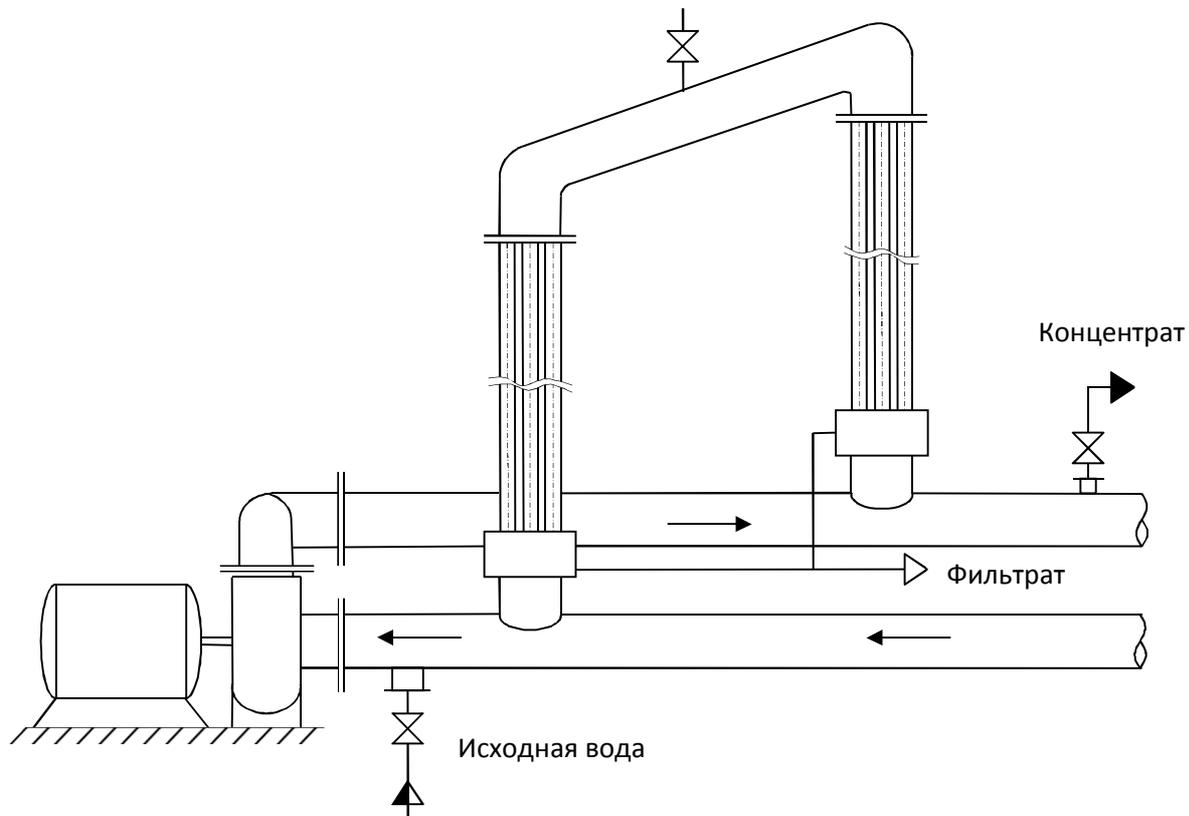


Рисунок 9.7 - Блок микрофльтрационной установки непрерывного действия

9.2 Расчет микрофилтров непрерывного действия

Расчет микрофилтра сводится к определению требуемого числа фильтрующих элементов в установке $Z_{эл}$ и к подбору соответствующего циркуляционного насоса.

Производительность установки по фильтрату, $м^3/с$

$$V_{\phi} = Z_{эл} \cdot q F_{эл}, \quad (9.3)$$

где q – удельная производительность элемента по фильтрату, $м^3/(м^2 \cdot с)$; $F_{эл}$ – площадь фильтрующей поверхности элемента, $м^2$.

Обычно в начале расчета производительность установки по фильтрату V_{ϕ} неизвестна; задана лишь требуемая производительность по суспензии V_c , $м^3/с$.

Эти величины связаны материальным балансом

$$V_c = V_{\phi} + V_k, \quad (9.4)$$

где V_k – объем концентрата, образующийся в единицу времени, м³/с.

Материальный баланс по твердой фазе

$$V_c c_c = V_\phi c_\phi + V_k c_k. \quad (9.5)$$

Поскольку $c_\phi \approx 0$, то $V_c c_c = V_k c_k$, (9.6)

где c_c, c_k - концентрации твердой фазы соответственно в исходной воде и в концентрате, кг/м³. Величиной c_k – задаются; это предельно допустимая концентрация твердой фазы, при которой еще возможно перекачивание суспензии.

Выразим расход концентрата как $V_k = V_c - V_\phi$ и подставим его в (9.6).
Получим

$$V_\phi = \frac{V_c (c_k - c_c)}{c_k}. \quad (9.7)$$

Расчетное число ТФЭ, необходимое для обеспечения заданной производительности установки, найдем из (9.3):

$$Z_{\text{эл}} = \frac{V_\phi}{q \cdot F_{\text{эл}}} = \frac{V_c (c_k - c_c)}{q \cdot F_{\text{эл}} c_k}. \quad (9.8)$$

Подбор циркуляционного насоса. Для подбора насоса необходимо оценить требуемый расход циркулирующей жидкости и напор.

Расход находят, исходя из оптимального значения скорости циркуляции суспензии в трубках элемента $w_{\text{опт}} = 4 \div 6$ м/с. Например, для ТФЭ марки БТМ, состоящего из 7 трубок внутренним диаметром 13 мм

$$V_{\text{ц}} = w_{\text{опт}} \cdot n \frac{\pi d^2}{4} \frac{Z_{\text{эл}}}{2},$$

где $n = 7$; $d = 0,013$ м.

Требуемый напор находят как сумму потерь напора на трение в циркуляционном контуре и потерь напора на преодоление местных сопротивлений в соединениях трубопроводов и элементов.

$$\Delta p = \sum \Delta p_{\text{м.с.}i} + \Delta p_{\text{тр.}} \quad (9.10)$$

Полезная мощность циркуляционного насоса должна быть не менее

$$N = \Delta p V_{\text{ц.}} \quad (9.11)$$

Микрофильтры не нашли пока широкого промышленного применения. Во многом это обусловлено несовершенством фильтрующих материалов. Но сейчас ведется активная работа в этом направлении. Такие аппараты очень перспективны.

Пример 4

Рассчитать требуемое количество стандартных фильтрующих элементов БТМ в установке, предназначенной для микрофльтрации $1 \text{ м}^3/\text{ч}$ суспензии, содержащей $3 \text{ кг}/\text{м}^3$ тонкодисперсных взвешенных веществ. Концентрация взвешенных веществ в фильтрате близка к нулю. Предельно допустимое содержание взвешенных веществ в концентрате (при котором возможно перекачивание суспензии) $c_k = 120 \text{ кг}/\text{м}^3$. Проницаемость мембран фильтрующего элемента $q_{\phi} = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Каждый элемент типа БТМ с внутренней фильтрующей поверхностью состоит из 7 трубок с внутренним диаметром 13 мм, длиной 2 м. Определить требуемый объемный расход циркулирующей суспензии и напор циркуляционного насоса, обслуживающего установку.

Решение

Определяем объемный расход фильтрата по формуле (8.7)

$$V_{\phi} = \frac{V_c(c_k - c_c)}{c_k} = \frac{1 \cdot (120 - 3)}{3600 \cdot 120} = 2,71 \cdot 10^{-4} \frac{\text{м}^3}{\text{с}}$$

Требуемое количество стандартных фильтрующих элементов по формуле (9.3)

$$Z_{\text{эл}} = \frac{V_{\phi}}{q \cdot F_{\text{эл}}} = \frac{2,71 \cdot 10^{-4}}{1,4 \cdot 10^{-5} \cdot 0,571} = 34,$$

где $F_{эл}$ – площадь поверхности стандартного фильтрующего элемента, m^2 ;
 $F_{эл} = 0,571 m^2$ (см. формулу (9.1)).

Для проведения процесса микрофильтрации необходимо обеспечить высокую скорость протекания жидкости вдоль мембран. Скорость жидкости $w_{ц}$ в трубках элемента БТМ должна быть не менее 4 м/с.

Расход жидкости, циркулирующей через каждую пару элементов, должен быть не менее

$$V_{ц2эл} = w_{ц} \cdot z \cdot \frac{\pi d_{тр}^2}{4} = 4 \cdot 7 \cdot \frac{3,14 \cdot 0,013^2}{4} = 3,715 \cdot 10^{-3} m^3/c.$$

В установке 17 пар элементов ($Z_{эл}/2=34/2=17$). Следовательно, производительность циркуляционного насоса должна быть не менее

$$V_{ц} = 17 V_{ц2эл} = 17 \cdot 3,715 \cdot 10^{-3} = 63,1 \cdot 10^{-3} m^3/c = 227 m^3/час.$$

Выбираем центробежный насос [12] с ближайшим большим расходом $V_{ц} = 280 m^3/ч$, имеющий всасывающий патрубок диаметром $d_{вс} = 200$ мм и нагнетательный патрубок $d_{нг} = 150$ мм.

Для определения требуемого напора насоса необходимо рассчитать потери давления в циркуляционном контуре установки, которые складываются из потерь давления на трение и потерь давления в местных сопротивлениях (соединениях трубопроводов).

Потери давления на трение во всасывающем и нагнетательном трубопроводе малы (большие диаметры, низкие скорости) и трудно поддаются расчету, поскольку скорость по длине трубопроводов существенно изменяется. Этими потерями можно пренебречь, поскольку основное гидравлическое сопротивление возникает при прохождении жидкости через фильтрующие элементы БТМ.

Потери давления в установке непрерывного действия

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3 + \Delta p_4 + \Delta p_5,$$

где Δp_1 – потери давления при повороте воды на 90° из нагнетательного трубопровода (коллектора) в переходник элемента БТМ;

Δp_2 – потери давления при входе потока в трубки элемента, при прохождении по длине трубок и на выходе из них;

Δp_3 – потери давления в верхнем калаче;

Δp_4 – потери давления при входе потока в трубки элемента, при прохождении по длине трубок и на выходе из них; $\Delta p_4 = \Delta p_2$;

Δp_5 – потери давления при повороте потока на 90° из переходника во всасывающий трубопровод (коллектор).

Переходник к элементу БТМ имеет внутренний диаметр $d_{\text{пер}} = 57$ мм. Скорость воды в переходнике

$$w_{\text{пер}} = \frac{V_{\text{ц2эл}}}{\pi d_{\text{пер}}^2 / 4} = \frac{4 \cdot 3,715 \cdot 10^{-3}}{3,14 \cdot 0,057^2} = 1,46 \text{ м/с.}$$

Потери давления при повороте потока на 90° из нагнетательного трубопровода (коллектора) в переходник элемента БТМ (поворот с сужением потока)

$$\Delta p_1 = \zeta_{1 \text{ пов.}90^\circ} \frac{\rho_{\text{ж}} w_{\text{пер}}^2}{2} = 2,8 \cdot \frac{1000 \cdot 1,46^2}{2} = 2984 \text{ Па.}$$

Потери давления при повороте потока на 90° из переходника элемента БТМ во всасывающий трубопровод (поворот с расширением потока)

$$\Delta p_5 = \zeta_{5 \text{ пов.}90^\circ} \frac{\rho_{\text{ж}} w_{\text{пер}}^2}{2} = 0,53 \cdot \frac{1000 \cdot 1,46^2}{2} = 565 \text{ Па.}$$

Коэффициенты местных сопротивлений при повороте потока на 90° с сужением $\zeta_{1 \text{ пов.}90^\circ}$ и при повороте потока на 90° с расширением $\zeta_{5 \text{ пов.}90^\circ}$ приняты по справочнику Идельчика [13].

Слагаемые Δp_2 и Δp_4 рассчитываются не только с учетом местных сопротивлений, но и с учетом потерь по длине

$$\Delta p_i = \left(\lambda_i \frac{l_i}{d_i} + \zeta_i \right) \frac{\rho w_i^2}{2}.$$

Коэффициент гидравлического трения при турбулентном течении в гидравлически гладких трубах можно оценить по формуле Блазиуса [14]

$$\lambda_i = \frac{0,316}{Re_i^{0,25}}.$$

Суммарные потери давления при входе потока в трубки элемента, при прохождении по длине трубок и на выходе из них

$$\Delta p_2 = \Delta p_4 = \left(\lambda_{2,4} \frac{l}{d} + \zeta_{\text{вх}} + \zeta_{\text{вых}} \right) \frac{\rho w_{\text{ц}}^2}{2}.$$

$$Re_{2,4} = \frac{w_{ц} d_{вн}}{v_{ж}} = \frac{4 \cdot 0,013}{1 \cdot 10^{-6}} = 52\,000;$$

$$\lambda_{2,4} = \frac{0,316}{52\,000^{0,25}} = \frac{0,316}{15,1} = 0,021;$$

$$\frac{S_0}{S_1} = \frac{d^2}{d_{пер}^2} = \frac{0,013^2}{0,057^2} = 0,052.$$

Коэффициенты местных сопротивлений по справочным таблицам [13,14]:

$\zeta_{вх} = 0,5$ – резкое сужение; $\zeta_{вых} = 1$ – внезапное расширение.

$$\Delta p_2 = \Delta p_4 = \left(0,021 \frac{2}{0,013} + 0,5 + 1 \right) \frac{1000 \cdot 4^2}{2} = 37\,846 \text{ Па.}$$

Потери давления в калаче

$$\Delta p_3 = \zeta_3 \frac{\rho_{ж} \cdot w_{кл}^2}{2},$$

где ζ_3 - коэффициент сопротивления калача; $\zeta_3 = AB$;

$w_{кл}$ – скорость жидкости в калаче; $w_{кл} = w_{пер} = 1,46 \text{ м/с}$.

Коэффициенты А и В находим по справочным таблицам [13,14]. При повороте потока в калаче на угол $\varphi = 180^\circ$ $A=1,4$; при отношении радиуса изгиба калача к диаметру трубы, из которой он согнут, $R_0/d = 5$ $B = 0,1$.

$$\zeta_3 = 1,4 \cdot 0,1 = 0,14.$$

$$\Delta p_3 = 0,14 \cdot \frac{1000 \cdot 1,46^2}{2} = 149 \text{ Па.}$$

Суммарные потери давления в установке

$$\Delta p = \sum_{i=1}^7 p_i = 2984 + 37\,846 + 149 + 37\,846 + 565 = 79390 \text{ Па.}$$

Необходимый напор циркуляционного насоса

$$H_{нас} > \frac{\Delta p}{\rho_{ж} g} = \frac{79390}{1000 \cdot 9,8} = 8,10 \text{ м.}$$

Принимаем насос 8ХО-12 [12] с производительностью $280 \text{ м}^3/\text{час}$, напором $21,3 \text{ м}$ водяного столба, с мощностью электродвигателя 27 кВт .

**КОНТРОЛЬНЫЕ РАБОТЫ ДЛЯ СТУДЕНТОВ ЗАОЧНОГО ОТДЕЛЕНИЯ
по дисциплине «Технология водоподготовки»**

Контрольная работа № 1

По классификатору технологий очистки поверхностных вод, содержащемуся в приложении к своду правил СП 31.13330.2012 [1], выбрать технологическую схему подготовки природной воды, имеющей показатели качества, приведенные в таблице 1. Временной фактор присутствия примесей в воде – постоянно в течение года.

Вычертить технологическую схему водоподготовки на листе формата А3 с соблюдением правил, содержащихся в методических указаниях по оформлению технологических схем [2]. При вычерчивании технологической схемы условные обозначения водоочистного оборудования принимать такими, как указано в учебных пособиях [3-8].

Номер варианта соответствует последней цифре в номере зачетной книжки.

Таблица 1 – Показатели качества исходной природной воды

№ варианта	Цветность воды, град	Мутность, мг/л	Температура, °С	рН	ПО*, мгО ₂ /л	Общая минерализация, мг/л	Жесткость, мг·экв/л	Антропогенный ингредиент
1	60	10	0-25	7-8	8-9	<1000	< 7	Нефтепродукты, 0,3 мг/л
2	210	20	0-30	6-8	10-25	<1000	< 7	Нефтепродукты, 0,3 мг/л
3	100	100	0-30	6-8	6-8	<1000	< 7	Нефтепродукты, 0,3 мг/л
4	15	300	0-25	7-9	5-7	<1000	< 7	Нефтепродукты, 0,3 мг/л

№ вар-та	Цветность воды, град	Мутность, мг/л	Температура, °С	рН	ПО*, мгО ₂ /л	Общая минерализация, мг/л	Жесткость, мг·экв/л	Антропогенный ингредиент
5	12	2000	0-30	7-9	3-8	<1000	< 7	Нефтепродукты, 0,3 мг/л
6	5	200	0-25	6-8	3-5	1500	10	Нефтепродукты, 0,3 мг/л
7	10	400	0-25	6-8	3-5	2000	12	Фенолы, 0,003 мг/л
8	15	1500	0-32	7-9	3-8	<1000	< 7	Фенолы, 0,003 мг/л
9	10	500	0-25	7-9	5-8	<1000	< 7	Фенолы, 0,003 мг/л
0	90	40	0-30	6-8	8-9	<1000	< 7	Фенолы, 0,003 мг/л

* перманганатная окисляемость.

Контрольная работа № 2

Номера индивидуальных заданий

Буква, с которой начинается фамилия студента	Номер задания
А	1
Б	2
В	3
Г	4
Д	5
Е, Ё, Ж	6
З, И	7
К	8
Л	9
М	10
Н, О	11
П	12
Р	13
С	14
Т	15
У, Ф	16
Х, Ц	17
Ч, Ш	18
Щ, Э	19
Ю, Я	20

Задание 2.1

Рассчитать основные геометрические размеры тонкослойного прямого трубчатого отстойника непрерывного действия с пакетом (блоком) трубок квадратного сечения для очистки от взвешенных веществ V ($\text{м}^3/\text{сут}$) природной воды, содержащей x_n ($\text{кг}/\text{м}^3$) твердой фазы, до концентрации x_k ($\text{кг}/\text{м}^3$). Дисперсный состав твердой фазы:

δ , мкм	25	50	75	100	125	150
$R(\delta)$, %	90	70	50	30	10	0

Плотность твердой фазы $\rho_{\text{ТВ}}$ $\text{кг}/\text{м}^3$. Жидкая фаза – вода при температуре 20°C . Коэффициент трения скольжения осадка по материалу труб $k_{\text{тр}}$. Угол наклона блока трубок к горизонту α , $^\circ$.

№ варианта	V , $\text{м}^3/\text{сут}$	x_n , $\text{кг}/\text{м}^3$	x_k , $\text{кг}/\text{м}^3$	$\rho_{\text{ТВ}}$, $\text{кг}/\text{м}^3$	$k_{\text{тр}}$	α , $^\circ$
1	500	0,004	0,0012	1500	0,6	60
2	510	0,005	0,0015	1600	0,55	45
3	520	0,006	0,002	1700	0,50	60
4	530	0,001	0,0003	1800	0,54	45
5	540	0,002	0,0007	1900	0,56	60
6	550	0,003	0,0008	2000	0,57	45
7	560	0,004	0,0012	2100	0,58	60
8	570	0,005	0,0014	2200	0,59	45
9	580	0,006	0,0018	2300	0,6	60
10	590	0,001	0,0004	2400	0,61	45
11	600	0,002	0,0006	2500	0,62	60

12	610	0,003	0,0009	2600	0,63	45
13	620	0,004	0,0012	2500	0,64	60
14	630	0,005	0,0015	2400	0,65	45
15	640	0,006	0,0019	2300	0,51	60
16	650	0,001	0,0003	2200	0,52	45
17	660	0,002	0,0006	2100	0,53	60
18	670	0,003	0,001	2000	0,54	45
19	680	0,004	0,0012	1900	0,55	60
20	690	0,005	0,0016	1800	0,56	45

Задание 2.2

Определить требуемый диаметр и количество гидроциклонов для очистки V м³/час природной воды, содержащей x_n кг/м³ твердых примесей плотностью ρ_T кг/м³ до остаточной концентрации твердой фазы x_k кг/м³. Дисперсный состав примесей задан функцией $D(\delta_T)$.

№ варианта	V , м ³ /час	x_n , кг/м ³	x_k , кг/м ³	ρ_T , кг/м ³
1	80	0,021	0,006	2500
2	75	0,022	0,0065	2600
3	70	0,023	0,007	2700
4	65	0,024	0,0072	2400
5	60	0,025	0,0075	2300
6	63	0,026	0,0078	2200
7	66	0,027	0,008	2250
8	69	0,028	0,0085	2350
9	72	0,029	0,0088	2450

10	76	0,030	0,009	2550
11	79	0,031	0,0093	2650
12	82	0,032	0,0096	2280
13	85	0,033	0,0099	2320
14	88	0,034	0,01	2360
15	91	0,035	0,0105	2410
16	94	0,036	0,0108	2440
17	98	0,037	0,011	2470
18	100	0,038	0,0115	2510
19	103	0,039	0,0118	2540
20	106	0,04	0,012	2580

Задание 2.3

Рассчитать требуемый диаметр однослойного медленного фильтра с неподвижным слоем зернистой загрузки, время фильтроцикла и необходимый напор обслуживающего фильтр насоса. Загрузка – монодисперсный кварцевый песок с частицами шарообразной формы δ_3 , мм. Начальная порозность слоя $\varepsilon_0 = 0,33$. Объемный расход воды V , м³/час. Рекомендуемая скорость фильтрования w_ϕ , м/час. Высота слоя H , м. Грязеемкость слоя E , кг/м³. Начальная концентрация взвешенных веществ x_n , кг/м³; требуемая их конечная концентрация x_k , кг/м³. Плотность осадка ρ_{oc} , кг/м³. Суммарное гидравлическое сопротивление распределительной системы и дренажа $\Sigma\Delta p_{mc}$, Па.

№ варианта	V , м ³ /ч	w_ϕ , м/ч	H , м	δ_3 , мм	E , кг/м ³	ρ_{oc} , кг/м ³	x_n , кг/м ³	x_k , кг/м ³	$\Sigma\Delta p_{mc}$, Па
1	10	2	0,8	0,5	125	1105	0,01	0,001	$1,0 \cdot 10^4$
2	15	3	0,85	0,6	150	1050	0,02	0,002	$1,05 \cdot 10^4$
3	20	4	0,9	0,7	175	1100	0,03	0,003	$0,90 \cdot 10^4$
4	25	2	0,95	0,8	200	1200	0,04	0,004	$0,95 \cdot 10^4$
5	5	3	1,0	1,0	100	1100	0,05	0,005	$1,1 \cdot 10^4$
6	10	4	1,05	0,5	125	1050	0,01	0,001	$1,2 \cdot 10^4$
7	15	2	1,1	0,6	150	1075	0,02	0,002	$1,0 \cdot 10^4$
8	20	3	1,15	0,7	175	1100	0,03	0,003	$1,08 \cdot 10^4$
9	25	4	1,2	0,8	200	1080	0,04	0,004	$1,2 \cdot 10^4$
10	5	2	1,25	1,0	100	1150	0,05	0,005	$0,98 \cdot 10^4$
11	10	3	1,3	0,5	125	1120	0,01	0,001	$1,02 \cdot 10^4$
12	15	4	1,2	0,6	150	1110	0,02	0,002	$1,1 \cdot 10^4$
13	20	2	1,1	0,7	175	1090	0,03	0,003	$1,0 \cdot 10^4$
14	25	3	1,0	0,8	200	1105	0,04	0,004	$0,9 \cdot 10^4$
15	5	4	0,9	1,0	100	1100	0,05	0,005	$1,0 \cdot 10^4$

16	10	2	1,0	0,5	125	1090	0,01	0,001	$1,3 \cdot 10^4$
17	15	3	1,1	0,6	150	1150	0,02	0,002	$1,2 \cdot 10^4$
18	20	4	1,0	0,7	175	1120	0,03	0,003	$1,1 \cdot 10^4$
19	5	2	0,9	0,8	200	1080	0,04	0,004	$1,05 \cdot 10^4$
20	12	3	1,15	1,0	100	1100	0,05	0,005	$1,08 \cdot 10^4$

Задание 2.4

Рассчитать требуемое количество стандартных фильтрующих элементов БТМ 0,5/2 в установке, предназначенной для микрофильтрации V л/час воды, содержащей $0,03 \text{ кг/м}^3$ тонкодисперсных взвешенных веществ. Концентрация взвешенных веществ в фильтрате близка к нулю. Предельно допустимое содержание взвешенных веществ в концентрате, при котором возможно перекачивание суспензии, составляет 30 кг/м^3 . Проницаемость мембран фильтрующих элементов при рабочем давлении $0,4 \text{ МПа}$ равна $1,4 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Каждый элемент БТМ 0,5/2 с внутренней фильтрующей поверхностью состоит из 7 трубок с внутренним диаметром 13 мм, длиной 2 м. Во избежание отложений твердой фазы на фильтрующей поверхности, скорость жидкости в трубках элемента должна быть не менее 4 м/с. Внутренний диаметр переходников к элементам БТМ составляет 57 мм, длина переходников 100 мм. Радиус изгиба верхнего калача равен пяти диаметрам трубы, из которой он изготовлен. Определить требуемые производительность и напор циркуляционного насоса, обслуживающего установку. Подобрать соответствующий центробежный насос.

№ варианта	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
V , л/ч	500	560	600	640	680	720	750	800	840	880
№ варианта	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
V , л/ч	900	960	1000	1200	850	760	660	550	480	400

Литература

- 1 Фрог, Б.Н. Водоподготовка: учебное пособие для вузов /Б.Н.Фрог, А.П. Левченко. – М.: МГУ, 2014. – 680 с.
- 2 СП 31.13330.2012 Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84.
- 3 ГОСТ Р 51232-98. Вода питьевая. Общие требования к организации и методам контроля качества. – М.: Госстандарт, 1998.
- 4 СанПиН 2.1.4.1074-01 Питьевая вода. Гигиенические требования к качеству воды централизованных систем питьевого водоснабжения. – М.: Рид Групп, 2012. – 123 с.
- 5 Яблокова, М.А. Оборудование для механической очистки промышленных сточных вод: Учебное пособие / М.А. Яблокова. – СПб.: СПбГТИ(ТУ). - 2011. – 91 с.
- 6 Островский, Г.М. Прикладная механика неоднородных сред / Г.М. Островский. – СПб.: Наука. – 2000. – 359 с.
- 7 Островский, Г.М. Принципы осаждения в тонкослойных отстойниках // Новый справочник химика и технолога. Т.6. Ч.2. – СПб.: Профессионал, 2006. – С.64-71.
- 8 Яблокова, М.А. Конструкции тонкослойных отстойников // Новый справочник химика и технолога. Т.6. Ч.2. – СПб.: Профессионал, 2006. – С.72-79.
- 9 Курганов, А.М. Справочник по гидравлическим расчетам систем водоснабжения и водоотведения / А.М. Курганов, Н.Ф. Федоров. - Л.: Стройиздат, 1986. - 440 с.
- 10 Люторович, В.А. Выполнение технологической схемы на стадии эскизного проекта: учебное пособие / В.А. Люторович, Е.Н. Булина, Е.А. Пономаренко. - СПб.: СПбГТИ(ТУ), 2015. - 25 с. (ЭБ).
- 11 Жужиков, В.А. Фильтрация: теория и практика разделения суспензий. – М.: Химия, 1971. – 400 с.
- 12 Абиев, Р.Ш. Машины для перемещения жидкостей и газов // Новый справочник химика и технолога. Т.6. Ч.1. – СПб.: Профессионал, 2006. – С.361–404.
- 13 Идельчик, И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. 3-е изд. М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.
- 14 Павлов, К.Ф.. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии/ К.Ф.Павлов, П.Г.Романков, А.А.Носков. – Л.: Химия, 1987. -576с.
- 15 Каталог озонаторов Курганхиммаш <http://kurgankhimmash.ru/files/flib/539.pdf>

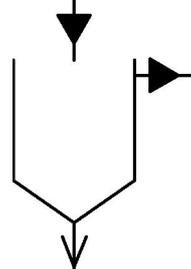
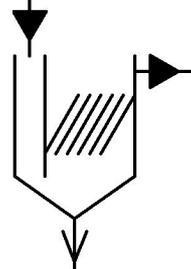
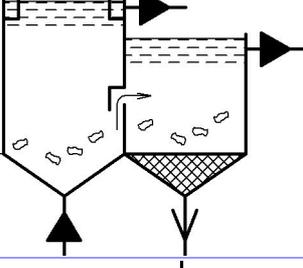
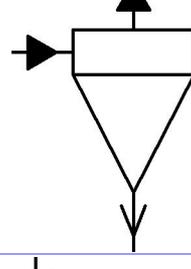
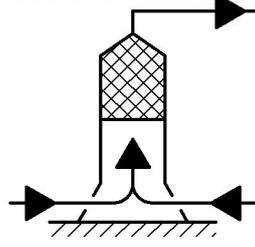
СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1 Основные показатели качества воды.....	6
2 Требования, предъявляемые к воде различными потребителями.....	17
3 Сооружения для улучшения качества питьевой воды (сооружения водоподготовки).....	21
4 Коагулирование примесей воды и сооружения для коагуляции.....	35
4.1 Технологическая схема процесса очистки воды коагуляцией.....	38
4.2 Обработка воды коагуляцией в контактных осветителях.....	42
4.3 Электрокоагуляция.....	43
5 Отстойники.....	45
5.1 Отстойники емкостного типа.....	45
5.2 Тонкослойные отстойники.....	49
5.2.1 Трубчатые отстойники.....	50
5.2.2 Пластинчатые отстойники.....	51
5.2.3 Расчет тонкослойных отстойников.....	54
6 Гидроциклоны.....	61
7 Зернистые фильтры.....	68
8 Обеззараживание воды.....	79
8.1 Методы обеззараживания воды.....	79
8.2 Хлорирование воды.....	80
8.3 Электролизные установки для обеззараживания воды.....	84
8.4 Озонирование воды.....	86
8.5 Обеззараживание воды бактерицидными лучами.....	90
9 Доочистка водопроводной воды микро-ультрафильтрацией.....	97
9.1 Типы фильтрующих элементов и конструкции микрофильтров.....	98
9.2 Расчет микрофильтров непрерывного действия.....	105
10 Контрольные работы для студентов заочного отделения	111
Контрольная работа № 1.....	111
Контрольная работа № 2.....	113
Задание 2.1.....	114
Задание 2.2.....	116
Задание 2.3.....	118
Задание 2.4.....	119
Литература.....	120
Приложение. Условные графические обозначения оборудования водоподготовки на технологических схемах.....	122

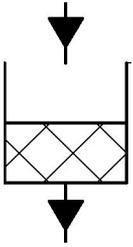
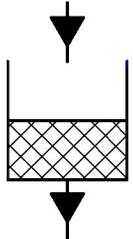
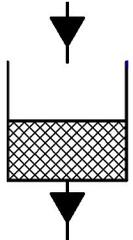
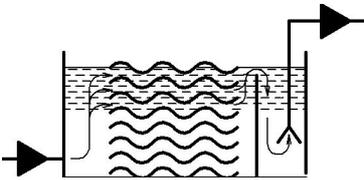
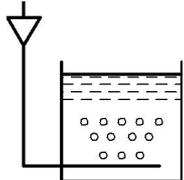
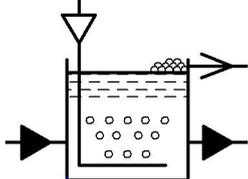
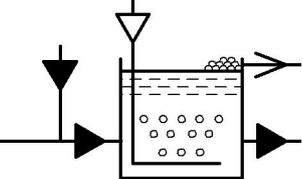
ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

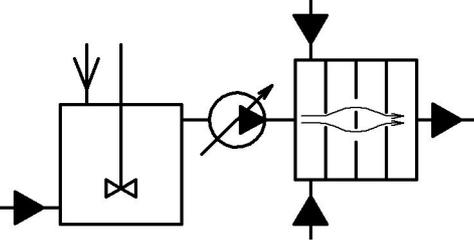
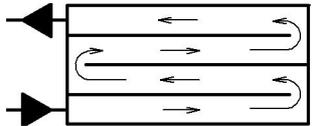
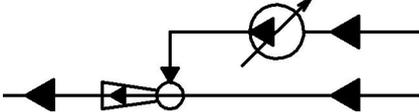
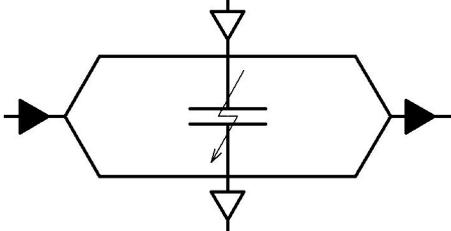
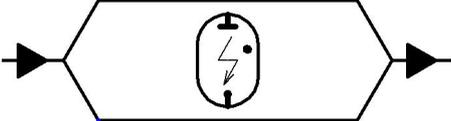
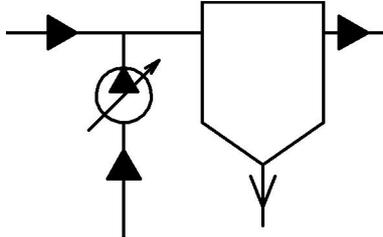
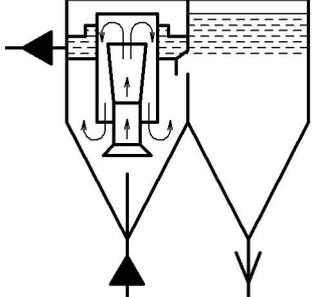
Условные графические обозначения оборудования водоподготовки на технологических схемах

Наименование	Обозначение
1. Отстойник емкостной	
2. Отстойник с тонкослойными модулями	
3. Отстойник со взвешенным слоем осадка	
4. Гидроциклон	
5. Барабанный сетчатый фильтр	
6. Оголовок с фильтрующей засыпкой	

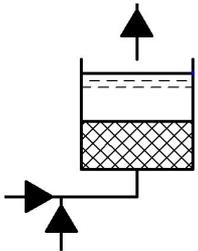
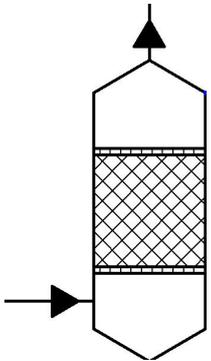
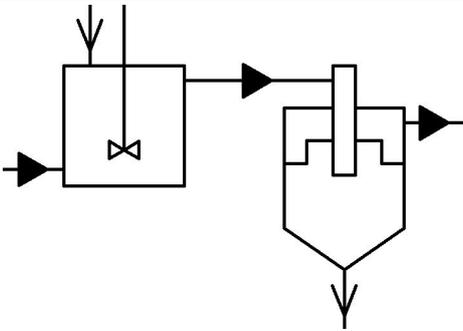
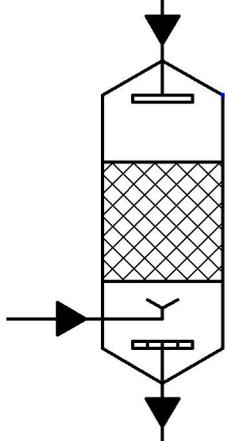
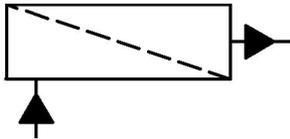
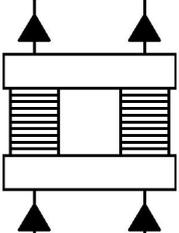
Продолжение приложения А

<p>7. Префильтр с крупнозернистым материалом</p>	
<p>8. Скорый зернистый фильтр</p>	
<p>9. Медленный зернистый фильтр</p>	
<p>10. Биореактор с прикрепленной микрофлорой</p>	
<p>11. Емкость для аэрирования воды</p>	
<p>12. Флотатор без применения реагентов</p>	
<p>13. Флотатор с применением реагентов</p>	

Продолжение приложения А

<p>14. Коагулятор или флокулятор (дозатор+смеситель)</p>	
<p>15. Камера хлопьеобразования</p>	
<p>16. Аппарат для хлорирования воды</p>	
<p>17. Аппарат для озонирования воды</p>	
<p>18. Аппарат для обработки воды УФ-облучением</p>	
<p>19. Аппарат для реагентного отстаивания</p>	
<p>20. Реагентный осветлитель с рециркуляцией взвешенного осадка</p>	

Продолжение приложения А

<p>21.Аппарат для реагентного скорого фильтрования (контактной коагуляции)</p>	
<p>22.Адсорбер с неподвижным слоем зернистого адсорбента</p>	
<p>23.Адсорбер-смеситель с порошкообразным сорбентом</p>	
<p>24.Ионообменный фильтр</p>	
<p>25.Аппарат обратного осмоса</p>	
<p>26. Электродиализный аппарат</p>	

Кафедра инженерного проектирования

Учебное пособие

ТЕХНОЛОГИЯ ВОДОПОДГОТОВКИ

Марина Александровна Яблокова

Евгений Анатольевич Пономаренко

Отпечатано с оригинал- макета. Формат 60×90 $\frac{1}{16}$

Печ. л. 7,8. Тираж 20 экз. Заказ №

Санкт- Петербургский государственный технологический институт
(технический университет)

190013, Санкт-Петербург, Московский пр.,26
Типография издательства СПбТИ(ГУ) т.49-49-365