

1. СИСТЕМЫ ВОДОСНАБЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

1.1. Введение

Современные специалисты должны владеть научными основами новых технологий, владеть методами расчета сооружений, знать их возможности и области применения. Водоподготовка – сложная проблема, для решения которой используются различные методы, составляющие единую технологическую цепочку. Поэтому современный специалист должен хорошо изучить все процессы и методы очистки воды, представляя себе их достоинства и недостатки. С другой стороны, в различных аппаратах могут происходить сходные процессы (например, коагуляции в камерах хлопьеобразования и в каналах ультрафильтрационных аппаратов, или кристаллизации в осветлителях при известковании и в каналах обратноосмотических мембранных аппаратов, а также на греющих поверхностях выпарных аппаратов). Это требует знания теоретических основ всех процессов, используемых в очистке воды.

Процессы очистки воды постоянно совершенствуются, и области их применения постоянно меняются. Например, появившиеся еще несколько десятилетий назад мембранные процессы долгое время не рассматривались всерьез. А в настоящее время мембранные процессы обратного осмоса, ультрафильтрации, электродеионизации широко используются в новых проектах промышленной водоподготовки и при реконструкции существующих сооружений. Развитие мембранного метода обратного осмоса как нового метода опреснения воды сильно потеснило традиционно применявшиеся в этой области методы дистилляции и электродиализа. Но эти методы не перестали быть востребованными в практике водоочистки. Требования создания современных безотходных производств заставляют утилизировать стоки (часто установок ионного обмена), и для этой цели используются выпарные процессы. Другим способом ухода от проблемы утилизации регенерационных стоков

ионообменных установок при обессоливании воды является применение процесса электродеионизации – электродиализа в несколько измененном виде.

Процессы, используемые при очистке, умягчении и обессоливании воды (коагулирование, осаждение, ионный обмен, мембранный перенос), – те же, что используются в различных химических технологиях. Поэтому при разработке технологий очистки воды и расчетах аппаратов водоподготовки используются сходные методики, основанные на тех же закономерностях, что и при расчетах других химических технологий.

Часто специалисты путают понятия «процесс», «метод» и «технология». Название процесса часто отождествляют с методом и технологией. Например, говорят – процесс ионообменного умягчения. Между тем проблема умягчения воды (удаления из нее ионов жесткости) – это цель, которая решается с помощью целой технологической схемы, включающей ряд процессов и аппаратов. Например, умягчение может быть произведено с помощью различных методов: ионного обмена, нанофильтрации и др. Для умягчения используется целый ряд процессов: предочистки (коагуляции, фильтрования), ионного обмена, регенерации ионообменных фильтров и др., происходящих в различных аппаратах (осветлителях, фильтрах, эжекторах, мерниках). На самом деле ионообменный процесс, происходящий в ионообменном фильтре (аппарате), – лишь один из процессов, входящих в технологическую схему умягчения воды. Основная сложность курса «Водоснабжение и водоотведение промышленных предприятий» – необходимость знания методов водоподготовки и очистки сточных вод и умения объединить в технологическую цепочку сразу несколько процессов. При этом необходимо знание основ, возможностей и областей применения каждого из процессов.

Под процессом понимают изменение состояния вещества, происходящее в определенных условиях. В окружающей нас природе наблюдаются явления, которые называют естественными процессами. На основе данных, полученных в результате естественных процессов и анализа достижений науки и техники, разрабатывают и реализуют многочисленные промышленные

процессы с целью производства продуктов потребления. Такие процессы называют **производственными** или **технологическими** процессами. Изучение технологических процессов составляет предмет и задачу **технологии** – науки, определяющей условия практического применения законов естественных наук (физики, химии, механики и др.) для наиболее эффективного проведения разнообразных технологических процессов. Технология непосредственно связана с производством, а производство постоянно находится в развитии, поэтому технологии постоянно совершенствуются.

Многие технологические процессы могут быть реализованы с помощью различных **методов** в соответствующем **аппаратурном** оформлении. Например, технологический процесс умягчения (удаления из воды ионов жесткости) может быть осуществлен либо методами ионного обмена (метод На-катионирования, метод Н-катионирования с «голодной» регенерацией), либо реагентными методами (известкования, известково-содовым методом и др.), либо мембранными методами (нанофильтрации, обратного осмоса и др.). Выбор метода (в условиях его применения и аппаратного оформления) осуществляется на основе технико-экономического сравнения различных вариантов.

1.1.1. Общие сведения о системах водоснабжения промышленных предприятий и объектов теплоэнергетики

Система водоснабжения промышленного предприятия представляет собой комплекс сооружений, оборудования и трубопроводов, обеспечивающих забор воды из природного источника, очистку и ее обработку, транспортирование и подачу воды потребителям требуемых расходов и качества.

В системах технического водоснабжения предусматриваются также сооружения и оборудование, необходимое для приема отработавшей воды и подготовки ее для повторного использования, а также станции очистки сточных вод.

Кроме того, система водоснабжения должна обладать определенной степенью надежности, т. е. обеспечивать снабжение потребителей водой без снижения установленных показателей своей работы в отношении количества и качества подаваемой воды (перерывы в подаче воды, снижение подачи воды, ухудшение ее качества в недопустимых пределах).

Вода является обязательным компонентом всех технологических процессов различных производств. Поэтому задачей создания системы водоснабжения любого предприятия является обеспечение предприятия водой заданного качества и в необходимых количествах. Несоблюдение требований технологических процессов по качеству воды и надежности ее подачи приводит к ухудшению качества продукции, к ее удорожанию, выходу из строя технологического оборудования и к созданию аварийных ситуаций, опасных для жизни населения и состояния окружающей среды.

Помимо технологических нужд система водоснабжения промышленного предприятия должна также обеспечивать хозяйственно-питьевые нужды сотрудников, а также использоваться для других целей: отопления, охлаждения оборудования, пожаротушения и др.

Водопотребление предприятия зависит от целого ряда факторов: характера использования воды, объема и вида выпускаемой продукции, технологии производства, системы промышленного водоснабжения. Вода на предприятии выполняет различные функции:

- используется в качестве промышленного сырья, растворителя или реакционной среды;
- экстрагентные – для извлечения из продукта или сырья нежелательных примесей; для очистки газообразных выбросов; очистки твердых отходов от водорастворимых компонентов; мойки оборудования;
- охлаждающая – для использования в качестве хладагента;
- транспортирующая – в качестве транспортирующего агента (например, на горно-обогатительных комбинатах);
- использование воды в качестве теплоносителя.

В черной металлургии, а также в нефтехимической и химической промышленности около 80% всей расходуемой воды используется для охлаждения. В целлюлозно-бумажной промышленности 90% потребляемой воды используется в качестве экстрагента.

На суммарное водопотребление предприятий важное влияние оказывают вид выпускаемой продукции и объемы выпуска. Расход воды на единицу выпускаемой продукции может составлять от нескольких кубических метров до нескольких тысяч.

Расходование воды в различных отраслях промышленности на единицу продукции ($\text{м}^3/\text{т}$) составляет:

- уголь – 3–5;
- нефть (переработка) – 30–50;
- сталь – 50–150;
- чугун – 150–200;
- бумага – 200–400;
- химические удобрения – 300–600;
- хлопчатобумажные ткани – 300–1000;
- синтетическое волокно – 2500–5000.

Нормы расходования воды определяются технологическими расчетами для каждой конкретной технологии. Высокие нормы водопотребления и, как следствие, большие сбросы сточных вод в водоемы являются, как правило, результатом несовершенства существующих технологических процессов и схем водного хозяйства, что приводит к повышению себестоимости продукции и неблагоприятному воздействию на окружающую среду.

Режимы расходования воды на промышленных предприятиях отличаются от режимов работы систем коммунального водоснабжения и определяются особенностями используемых технологических процессов. Режим водопотребления на предприятиях может быть равномерным, эпизодическим или по графику. Во многих отраслях промышленности имеют место сезонные различия в водопотреблении.

Дефицит свежей чистой воды, постоянно растущее водопотребление и необходимость охраны водных источников от загрязнения и истощения требуют разработки новых путей решения проблемы обеспечения предприятий водой. Одним из основных путей решения этой проблемы является уменьшение забора свежей воды из источников и уменьшение сброса в них отработанных вод за счет повторного использования воды в производстве и создания замкнутых систем водоснабжения. Эффективным средством рационального использования воды в производстве является повторное использование доочищенных бытовых сточных вод. Решающую роль в этом играют разработка новых технологий очистки воды и совершенствование технологических процессов. Одним из важных методов сокращения потребления пресной воды является использование опресненных минерализованных морских и подземных вод. Принятие любых решений осуществляется на основе технико-экономического сравнения различных вариантов. Экономическим стимулом для снижения водопотребления является плата промышленными предприятиями за воду.

Система водоснабжения представляет собой сложный комплекс сооружений, взаимосвязанных в работе. Сооружения должны быть рассчитаны так, чтобы обеспечивалась их четкая работа в общей цепи, а потребитель в результате получал нужное количество воды заданного качества под необходимым напором. С этой целью для каждого из сооружений строго установлены расчетные расходы:

Максимальный суточный расход, на который рассчитываются водозаборные сооружения, очистная станция, резервуар и насосные станции первого и второго подъема.

Средний часовой расход в сутки наибольшего водопотребления, необходимый для установления расчетной (средней) часовой производительности водозаборных сооружений, очистной станции и расчета водоводов первого подъема.

Максимальный часовой и соответствующий ему **секундный расход** воды, на которые рассчитывается водопроводная сеть и производительность насосной станции при подаче пожарного или максимального хозяйственного расхода без напорно-регулирующих сооружений.

После определения необходимого объема водопотребления объекта и сбора сведений о возможных для использования природных источниках, выбирается конкретный источник водоснабжения и намечается схема производственного водоснабжения.

1.1.2. Нормативное обеспечение проектирования систем водоснабжения промышленных предприятий

При проектировании систем водоснабжения промышленных предприятий следует руководствоваться рядом нормативных документов.

СП 31.13330.2012. Водоснабжение. Наружные сети и сооружения. Актуализированная редакция СНиП 2.04.02-84*.

СП 30.13330.2020. Внутренний водопровод и канализация зданий.

СП 56.13330.2011. Производственные здания. Актуализированная редакция СНиП 31-03-2001 (с изменениями №1, 2).

СП 44.13330.2011. Административные и бытовые здания. Актуализированная редакция СНиП 2.09.04-87 (с Поправкой, с Изменениями № 1, 2).

СП 8.13130.2020. Системы противопожарной защиты. Источники наружного противопожарного водоснабжения. Требования пожарной водоснабжения.

ГОСТ 25151-82 (СТ СЭВ 2084-80). Водоснабжение. Термины и определения.

ГОСТ 30813-2002. Вода и водоподготовка. Термины и определения.

СанПиН 2.1.3684-21 Санитарно-эпидемиологические требования к содержанию территорий городских и сельских поселений, к водным объектам, питьевой воде и питьевому водоснабжению, атмосферному воздуху, почвам,

жилым помещениям, эксплуатации производственных, общественных помещений, организации и проведению санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий.

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

При проектировании хозяйственно-питьевого водопровода на предприятиях качество питьевой воды в нем регламентируется СанПиН 1.2.3685-21.

Также есть специализированные документы, относящиеся к проектированию котельных установок и тепловых сетей.

СП 89.13330.2016 Котельные установки. Актуализированная редакция СНиП II-35-76.

СП 124.13330.2012 Тепловые сети. Актуализированная редакция СНиП 41-02-2003.

РД 34.37.522-88 Методические указания по коррекционной обработке питательной и котловой воды барабанных котлов давлением 3,9-13,8 МПа (с Изменениями №1, 2).

Руководящие указания по известкованию воды на электростанциях. М., Энергонот ОРГРЭС, 1973.

Руководящие указания по проектированию термических деаэрационных установок питательной воды, 1968 (ЦКТИ им. Ползунова, ВТИ им. Дзержинского).

Руководящие указания по коагуляции воды на электростанциях. М., Энергонот ОРГРЭС, 1973.

При эксплуатации сооружений водоподготовки используют следующую нормативно-правовую документацию:

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

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

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

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

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

Общие нормативно-правовые документы

Водный кодекс Российской Федерации (с изменениями на 02.07.2021 года).

Федеральный закон РФ от 27.12.2002 №184-ФЗ «О техническом регулировании» (с изменениями на 02.07.2021).

Федеральный Закон от 10.01.2002 №7-ФЗ «Об охране окружающей среды» (с изменениями на 02.07.2021).

Федеральный закон от 04.05.2011 №99-ФЗ «О лицензировании отдельных видов деятельности» (с изменениями на 02.07.2021 года).

Федеральный закон от 29.06.2015 №162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации» (с изменениями на 30.12.2020 года).

Федеральный закон от 26 июня 2008 №102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» (с изменениями на 11.06.2021 года).

Постановление Правительства РФ от 05.08.1997 №17. Правила сертификации работ и услуг в Российской Федерации. Утверждены Постановлением Госстандарта России от 05.08.1997 (в ред. Постановления Правительства РФ от 05.07.2002 №56).

1.1.3. Достижения отечественной и зарубежной науки и техники в создании маловодных технологий и замкнутых системах водного хозяйства промышленных предприятий

При потреблении воды в технологических процессах и при эксплуатации водоподготовительных установок образуется большое количество загрязненных сточных вод, насыщенных различными примесями, порой очень вредными, в силу этого сточные воды промышленных предприятий представляют серьезную угрозу окружающей среде, а проблема охраны водоемов от загрязнения сточными водами промышленных предприятий является весьма актуальной.

Существенно снизить потребление воды на производственные нужды из источников водоснабжения и уменьшить сброс сточных вод в водоемы позволяет создание на промышленных предприятиях оборотных систем водоснабжения и наиболее совершенных замкнутых систем водного хозяйства, практически исключающих сброс сточных вод в водоемы. Такие системы в зарубежной практике называют Zero Liquid Discharge (ZLD) systems – системы с нулевым жидким сбросом. Нулевой сброс жидкости (ZLD) – это процесс очистки, целью которого является удаление всех жидких отходов из системы. Целью ZLD является экономичное сокращение сточных вод и производство чистой воды, пригодной для повторного использования.

Создание замкнутых систем водного хозяйства возможно только в совокупности с внедрением новых, более совершенных, маловодных и безводных технологий и аппаратов основных технологических процессов, обеспечивающих комплексную переработку сырья и существенно уменьшающих количество и загрязненность образующихся сточных вод, при использовании принципиально новых систем водоснабжения, методов и схем регенерации сточных вод с одновременным извлечением ценных компонентов и доведением их до качества товарного продукта или вторичного сырья.

Основные принципы создания замкнутых систем водного хозяйства промышленных предприятий были сформулированы Л.А. Алферовой и А.П. Нечаевым.

Во-первых, водоснабжение и канализация должны рассматриваться в совокупности, когда на предприятиях создается единая система водного хозяйства, включающая водоснабжение, водоотведение и очистку сточных вод как подготовку для их повторного использования.

Во-вторых, для водоснабжения основными должны являться очищенные производственные и городские сточные воды, а также поверхностные стоки. Свежая вода из водоисточников должна использоваться в производстве только для особых целей и восполнения потерь воды в системе.

В-третьих, очистка должна сводиться к регенерации отработанных технологических растворов и воды с целью их повторного использования в производстве. Регенерации должны подвергаться локальные потоки отработанных технологических растворов и сточных вод, при этом должны создаваться локальные замкнутые системы технического водоснабжения, которые являются основным звеном замкнутых систем водного хозяйства промышленных предприятий.

В-четвертых, методы, применяемые для регенерации технологических растворов и воды, должны обеспечивать одновременное извлечение ценных компонентов и доведение образующихся отходов до товарного продукта или до вторичного сырья при минимальных материальных и энергетических затратах.

Проектировать системы использования воды целесообразно одновременно с проектированием основной технологии с учетом научно обоснованных требований к качеству используемой воды и правилам ее использования. При этом регенерация отработанных технологических растворов и воды из сточных вод рассматривается не как вспомогательная, а как завершающая операция производства товарного продукта.

Создание замкнутых систем водного хозяйства промышленных предприятий, комплексов и районов – задача чрезвычайно сложная, требующая

громадных капитальных вложений, новых технологий и, конечно, времени. Решение этой задачи можно рассматривать как целевую установку при разработке новых и реконструкции действующих систем производственного водоснабжения.

В настоящее время уровень водооборота на предприятиях черной и цветной металлургии по отрасли составляет около 80 %, на предприятиях химической промышленности – около 83 %, на предприятиях целлюлозно-бумажной промышленности – около 65 %. В то же время на отдельных предприятиях черной металлургии водооборот достигает до 97 % (Новолипецкий металлургический комбинат).

Даже при таком уровне повторного использования воды расход свежей воды еще достаточно велик и составляет в среднем на 1 т продукции – в черной металлургии 37-40 м³, в цветной металлургии 100-200 м³, в целлюлозно-бумажной промышленности – 150-500 м³.

Пример отдельных предприятий говорит о том, что современный уровень технологии и техники очистки обеспечивает получение воды любой заданной степени чистоты из любой сточной воды. В связи с этим создание замкнутых систем тормозится причинами экономического и организационного характера.

Замкнутые системы водопользования должны иметь экономические и экологические преимущества перед существующими. Затраты на регенерацию воды из сточных вод и затраты на доведение извлеченных из воды примесей до товарного продукта или вторичного сырья должны быть ниже суммарных затрат на забор воды из источника, водоподготовку и очистку сточных вод до показателей, позволяющих сбрасывать последние в водные объекты.

Рассмотрим ниже основные технологии, которые используются в водоподготовке для сокращения объема сточных вод. Наиболее часто в технологии ZLD применяются концентраты рассола и кристаллизаторы, которые используют термическое испарение для превращения рассола в воду высокой степени очистки и твердый сухой продукт, готовый для захоронения или для извлечения соли. Также перспективно применение ряда мембранных

процессов для сокращения объема жидкого стока: электродиализ, обратимый электродиализ, прямой и обратный осмос, мембранная дистилляция. Эти процессы работают с высоким коэффициентом извлечения и используются в различных комбинациях для предварительного концентрирования стоков, чтобы снизить стоимость их обработки и повысить общую эффективность систем ZLD.

Предварительное концентрирование потока сточных вод является очень важным этапом из-за того, что оно уменьшает объем отходов и значительно сокращает очень дорогостоящий этап выпаривания / кристаллизации. Обычно это достигается с помощью электродиализа, прямого осмоса или мембранной дистилляции. Также для этой цели можно использовать и обратный осмос (RO), однако указанные выше процессы могут эффективно работать при гораздо более высоком содержании солей, чем обратный осмос, например обратный осмос (150 г/л, 200 г/л и 250 г/л против 70 г/л соответственно).

Следующая стадия концентрирования – это выпаривание. Используют выпариватели бывают разных типов: вакуумные, тонкопленочные, с восходящим и нисходящим потоком, с принудительной циркуляцией, комбинированные. Обычно подаваемый раствор нагревают с помощью предварительного теплообменника, чтобы снизить теплотребление испарителя за счет передачи тепла от горячего конденсата к потоку сырья. Обработываемые растворы нагреваются в теплообменнике с помощью пара, электричества, пламени или другого источника тепла и закипают, образуя поток концентрированной жидкости и поток водяного пара, которые можно выпускать или конденсировать. В испарителях извлекается примерно 95% воды. Затем концентрированный раствор (рассол) можно направить в кристаллизатор для получения сухого продукта.

1.2. Системы водоснабжения промышленных предприятий

1.2.1. Нормы и режимы расходования воды на производственные нужды

Расчетная потребность предприятия в технической воде в значительной мере зависит от типа используемого оборудования и принятой схемы технологического процесса. Она может определяться только по технологическим данным водопотребляющего оборудования.

В справочной литературе приводятся данные по удельным нормам расхода воды на единицу продукции (на единицу веса готового продукта). Данные получены в результате обработки и осреднения величин расходов воды (той или иной отраслью промышленности). Но эти нормы не в полной мере учитывают специфику каждого конкретного предприятия и могут быть использованы лишь для ориентировочных расчетов.

Расчетные расходы воды для технических нужд можно определить так:

$$\begin{aligned} Q_{\text{пр}}^{\text{сут}} &= M_{\text{сут}} \cdot q_o, \\ Q_{\text{пр}}^{\text{час}} &= Q_{\text{пр}}^{\text{сут}} / 24 \end{aligned} \quad (1.1)$$

где $M_{\text{сут}}$ – количество выпускаемой продукции за сутки, ед. изм.; q_o – удельная норма водопотребления на единицу выпускаемой продукции, м³/(сут·ед.изм).

Хозяйственно-питьевое водоснабжение предназначено:

- для утоления жажды рабочих и служащих предприятия, приготовления пищи и мытья посуды;
- для помывки работающих на предприятиях в душевых и умывальных установках;
- на стирку в прачечных, на уборку помещений цехов, служб и отделов;
- на полив зеленых насаждений, тротуаров и проездов.

Расходы воды на хозяйственно-питьевые нужды промышленных предприятий должны определяться в соответствии с СП 30.13330.2012.

Суммарное суточное потребление хозяйственно-питьевой воды на предприятии определяется как:

$$Q_{\text{пром.х-п}}^{\text{сут}} = Q_{\text{х-п}}^{\text{сут}} + Q_{\text{душ}}^{\text{сут}} + Q_{\text{п}}^{\text{сут}} + Q_{\text{стол}}^{\text{сут}}, \quad (1.2)$$

где $Q_{х-п}$ – расчетный расход воды рабочими предприятия на умывание и мытье рук, утоление жажды и т.п.; $Q_{душ}$ – расчетный расход воды на душевые установки; Q_n – расчетный расход воды на полив территории; $Q_{стол}$ – расчетный расход воды в столовых предприятия.

Расчетный расход воды на хозяйственно-питьевые нужды в холодных и горячих цехах промышленного предприятия рассчитывается по нормам СП 30.13330.2012. На каждого рабочего и служащего предусматривается потребление 25 л воды в смену в обычных (холодных) цехах и 45 л на человека в смену в горячих цехах.

Горячие цеха – цеха с тепловыделением более 84 кДж на 1 м³/ч. Эти удельные нормы не включают воду, расходуемую в душевых, столовых и на полив территории предприятий.

Расчетные часовые расходы воды рабочими и служащими предприятия на умывание и питье за максимальную смену определяется с учетом коэффициентов суточной и часовой неравномерности потребления воды.

На производствах, связанных с загрязнением тела (или требующих особого санитарного режима), учитывается расход хозяйственно-питьевой воды в душевых из расчета $q_d = 500$ л/ч на 1 душевую сетку. Количество душевых сеток n_d определяется исходя из численности работающих, которым необходимо пользоваться душем по категории производства. Длительность работы душевых установок принимается равной 0,75 часа после окончания каждой смены.

Расчетный часовой расход (м³/ч) на душевых установках предприятия определяется по выражению:

$$Q_{душ}^{час} = 0,001 \cdot n_d \cdot \frac{q_d}{0,75}, \text{ м}^3 / \text{ч}. \quad (1.3)$$

Расчетное число человек на 1 душевую сетку определяется по СП 44.13330.2011.

Расчетный часовой расход воды (м³/ч) на полив территории предприятия определяется по формуле:

$$Q_{\Pi}^{\text{час}} = 0,001 \cdot \sum_{i=1}^{i=k} \frac{n_{\Pi i} \cdot F_{\Pi i} \cdot q_{\Pi i}}{\tau_{\Pi i}}, \text{ м}^3 / \text{ч}. \quad (1.4)$$

где $n_{\Pi i}$ – количество поливов территории определенного вида за сутки, раз/сутки; $F_{\Pi i}$ – площадь поливаемой территории данного вида, м²; $q_{\Pi i}$ – расход воды на один полив 1 м² конкретного вида поливаемой территории, л/м² (для асфальтированных покрытий: $q_n (\text{асф}) = 0,5$ л/м²; для зеленых насаждений: $q_n (\text{зел}) = 3 \dots 6$ л/м²); $\tau_{\Pi i}$ – продолжительность полива территории данного вида, ч/сутки; k – количество различных видов поливаемых площадей, шт.

Расчетный часовой расход воды (м³/ч) в столовых предприятия определяется так:

$$Q_{\text{стол}}^{\text{час}} = 0,001 \cdot k_{\text{ч}} \cdot \frac{q_{\text{бл}} \cdot n_{\text{бл}}}{\tau_{\text{см}}}, \text{ м}^3 / \text{ч}. \quad (1.5)$$

где $k_{\text{ч}}$ – коэффициент часовой неравномерности потребления воды в столовой ($k_{\text{ч}} = 1,5$); $q_{\text{бл}}$ – средняя норма расхода воды на одно приготовленное в столовой блюдо ($q_{\text{бл}} = 12$ л/блюдо); $n_{\text{бл}}$ – количество блюд, приготовленных в столовой за смену, блюд/смена; $\tau_{\text{см}}$ – продолжительность смены, часы.

Расход воды на наружное пожаротушение через гидранты нормируется СП 8.13130.2020 в зависимости от строительного объема производственных зданий, степени огнестойкости их строительных конструкций и категории производства по пожарной опасности, размещенного в рассматриваемых зданиях.

Расчетное количество одновременных пожаров на промышленном предприятии следует принимать в зависимости от занимаемой им площади; один пожар – при площади до 150 га, два пожара – при площади более 150 га.

При объединенном противопожарном водопроводе поселения и промышленных предприятий, расположенных вне поселения, расчетное количество одновременных пожаров следует принимать по п. 6.2 СП 8.13130.2020 в зависимости от площади промышленного предприятия и числа жителей в населенном пункте.

Для особенно ответственных предприятий расчетное количество одновременных пожаров устанавливает индивидуально Государственная противопожарная служба Российской Федерации.

Продолжительность тушения пожара должна приниматься 3 ч; для зданий I и II степеней огнестойкости с негорючими несущими конструкциями и утеплителем с помещениями категорий Г и Д по пожарной и взрывопожарной опасности – 2 ч.

Максимальный срок восстановления пожарного объема воды должен быть не более:

24 ч – в поселении и на промышленных предприятиях с помещениями категорий А, Б, В по пожарной и взрывопожарной опасности;

36 ч – на промышленных предприятиях с помещениями категорий Г и Д по пожарной и взрывопожарной опасности;

72 ч – в поселениях и на сельскохозяйственных предприятиях.

Основным фактором, определяющим работу всех элементов системы водоснабжения, является режим расходования воды потребителями, который может быть изображен в виде суточных графиков водопотребления.

Пример суточных графиков технического и хозяйственно-питьевого водопотребления промышленного предприятия показан на рис. 1.1 и 1.2.

Суточный график технического водопотребления более равномерен. Из-за разного количества оборудования, работающего в разное время, расход воды несколько изменяется. Значение коэффициента суточной неравномерности (представляющего собой отношение максимального суточного расхода к среднему суточному расходу за год) $k_{сут\ max}$ для прямоточных систем охлаждения может изменяться в более широких пределах вследствие изменения температуры природной воды по сезонам года.

Суточный график хозяйственно-питьевого водопотребления (рис. 1.2) носит пиковый характер из-за больших, но кратковременных расходов воды в душевых и в обеденные перерывы. Для этих потребителей $k_{сут\ max} \approx 1$, а коэффициент часовой неравномерности потребления воды $k_{час\ max} = 3...4$.

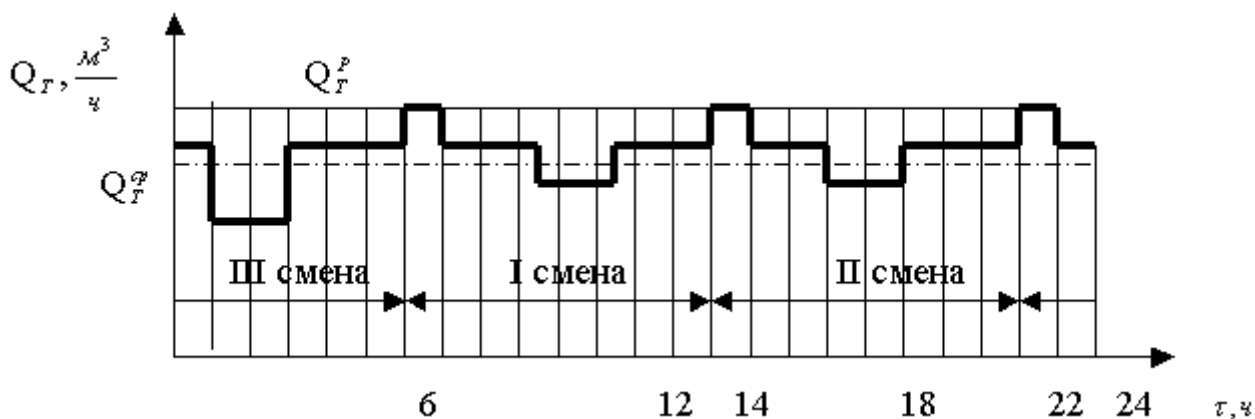


Рис. 1.1. График суточного технологического водопотребления.

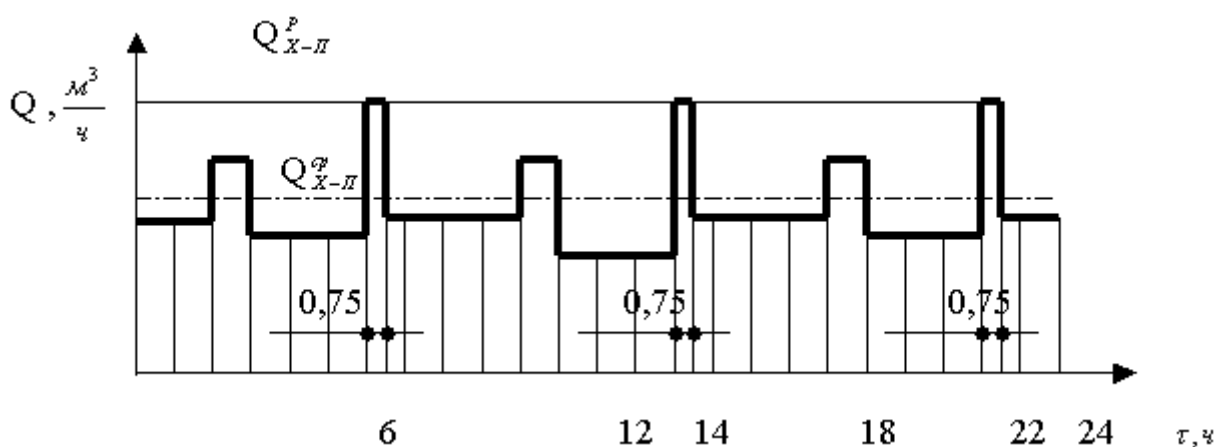


Рис. 1.2. График суточного потребления хозяйственно-питьевой воды.

1.1.4. Требования к качеству воды

Соответственно назначению воду для производственных целей можно разделить на четыре категории:

- вода **I** категории используется для охлаждения нагретых поверхностей (например, печей), жидких и конденсации газообразных продуктов (в теплообменных аппаратах и др.) без соприкосновения с продуктом; вода нагревается и практически не загрязняется, могут лишь присутствовать аварийные утечки жидких и газообразных продуктов в воду, загрязняющие ее;

- вода **II** категории служит в качестве среды, поглощающей различные нерастворимые (механические) и растворенные примеси; вода не нагревается (обогащение полезных ископаемых, гидротранспорт), но загрязняется в основном механическими и частично растворенными примесями;

- вода **III** категории используется так же, как и вода **II** категории, но подвергается нагреву (улавливание и очистка газов в скрубберах, тушение кокса и т.п.);

- воду **IV** категории используют в качестве экстрагента и растворителя реагентов (например, при флотационном обогащении природных ископаемых, промывке поверхностей и веществ и др.), и она загрязнена в основном растворимыми неорганическими и органическими веществами.

Качество и свойства воды, подаваемой для производственных целей, устанавливают в каждом конкретном случае в зависимости от роли воды и требований технологического процесса установок и производств с учетом используемого сырья.

Общими являются следующие требования к качеству и свойствам технической воды:

- она должна быть безвредной для здоровья обслуживающего персонала и не обладать отрицательными органолептическими свойствами (при открытой системе);

- она должна быть стабильной, т.е. использоваться для охлаждения продукта или конструктивных элементов оборудования; она не должна выделять механических, карбонатных или других солевых отложений свыше допустимой величины.

Допустимой величиной ориентировочно можно считать скорость отложения взвесей (механических и солевых) не более $0,25 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ или слой толщиной $0,08 \text{ мм}$ в месяц (при чистке аппаратов). При необходимости воду обрабатывают тем или иным способом;

- она не должна вызывать точечной и язвенной коррозии, а также равномерной коррозии металла со скоростью, превышающей $0,09 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ (или слой толщиной $0,1 \text{ мм}$ в год), и разрушения бетона; может быть допущена равномерная коррозия углеродистой стали со скоростью не более $0,45 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ (если слой до $0,5 \text{ мм}$ в год) при отсутствии признаков точечной или язвенной

коррозии. При необходимости применяют более стойкие материалы или воду обрабатывают тем или иным способом;

- она не должна способствовать развитию биологических обрастаний теплообменных аппаратов и охладителей оборотной воды со скоростью, большей $0,07 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ (слой $0,05 \text{ мм}$ в месяц) по воздушно-сухой массе.

Особенность развития современных предприятий состоит в том, что на них находятся различные виды производств и различные виды потребителей, что требует применения различных видов оборудования. Для современных предприятий характерен также переход на автономное обеспечение: использование собственных систем водоподготовки и теплоснабжения. Отказ от использования воды из централизованного водопровода заставляет использовать воду из скважин или технического водопровода (обычно представляет собой воду из поверхностного водисточника).

На каждом предприятии вода используется для различных целей:

1. Для хозяйственно-питьевых нужд (внутренний водопровод, душ, приготовление пищи), в ряде случаев имеет место разделение – водопровод и питьевая вода в пищеблоках.
2. Для горячего водоснабжения.
3. Для целей отопления (для теплосетей или паровых котельных).
4. Для подпитки оборотных систем охлаждения оборудования.
5. Для технологических нужд различных видов производств.

В зависимости от вида деятельности предприятия вода может быть использована в производственном цикле:

- для приготовления пищевых продуктов и напитков в пищевой промышленности;
- для приготовления лекарственных препаратов (фармацевтическая промышленность);
- для охлаждения технологического оборудования и продуктов производства (металлургическая, химическая промышленность);

- для производства пара (для нужд паросилового хозяйства) в энергетике, пищевой промышленности, химической и нефтяной промышленности и др.;
- для отмывки деталей (в электронной промышленности, гальванической промышленности, при производстве печатных плат и др.).

В табл. 1.1 представлены требования к качеству воды, предъявляемые основными отраслями промышленности и видами производств, а также основные технологические процессы, требующиеся для достижения этих качеств.

Требования к качеству воды, используемой в производственных процессах, постоянно меняются. С одной стороны, происходит постоянный процесс модернизации различных видов оборудования (для охлаждения, производства пара, отмывки и др.). С другой – этот процесс сопровождается ужесточением требований к качеству используемой воды. Например, появление новых конструкций паровых котлов с высокой температурной напряженностью (типа ДКВР) влечет за собой и ужесточение требований к питательной воде по ее общему солесодержанию. Новые технологии производства стекла и полимерных материалов ужесточают требования по солесодержанию и жесткости воды, используемой для отмывки готовой продукции. Решение проблем подготовки воды для различных потребителей связано с подбором необходимого оборудования, работа которого основана на различных методах. Однако вопросы подбора оборудования требуют знаний технологий производства, возможностей процессов очистки.

Таблица 1.1

Требования к качеству воды, принятые в различных отраслях промышленности

Показатель	Единица измерения	Вода для пищевых производств	Дистиллированная вода (ГОСТ 6709-72)	Вода для электронной промышленности	Водогрейные котлы	Паровые котлы среднего давления	Паровые котлы высокого давления ТЭЦ
1	2	3	4	5	6	7	8

Кальций Ca^{2+}	мг/л	1–7	0,05	–	–	–	–
Магний Mg^{2+}	мг/л	0	–	–	–	–	–
Общая жесткость ($\text{Ж}_{\text{общ}}$)	мг-экв/л	0,2	–	–	0,7	0,0	–
Натрий, калий $\text{Na}^+ + \text{K}^+$	мг/л	1,0	–	–	8–0,8	1	–
Хлориды Cl^-	мг/л	15	0,05	–	–	–	–
Сульфаты SO_4^{2-}	мг/л	25–100	0,02	–	–	–	–
Общая щелочность ($\text{Щ}_{\text{общ}}$)	мг-экв/л	20–100	–	–	–	–	–
Общее солесодержание	мг/л	0,5–1,5	–	–	–	–	<0,1
Электропроводность	μСм·м	100	–	–	–	–	≤0,01
Силикаты SiO_3^-	мг/л	–	5,4–6,6	0,01	–	–	–
Железо Fe^{2+}	мг/л	–	0,08	0,015	–	–	–
Фториды F^-	мг/л	0,1	–	–	–	–	–
Ион аммония NH_4^+	мг/л	–	–	–	–	–	–
Мутность	мг/л	–	–	–	–	–	–
Цветность	град ПКШ	1,0	–	–	–	–	–
Перманганатная окисляемость	мг/л	10	0,08	1,0	–	–	–
Карбонатный индекс $\text{KI} = [\text{Ca}][\text{HCO}_3]$	мг- экв/л ²	2,0–6,0	–	–	0,5	–	–
Удельное сопротивление	мОм/см	–	–	1,8	–	–	–
Растворенный кислород	мг/л	–	–	–	0,05	0,05	0,05
Требуемая технология		Умягчение	Обессоливание	Обессоливание	Умягчение	Глубокое умягчение	Глубокое обессоливание

1.2. Системы водоснабжения промышленных предприятий

1.2.1. Системы оборотного, прямоточного, последовательного, и оборотно-последовательного использования воды

Существуют три основные схемы промышленного водоснабжения: прямоточная схема, прямоточная схема с повторным использованием воды и оборотная схема. Существуют также комбинированные схемы водоснабжения, включающие элементы прямоточных и комбинированных схем.

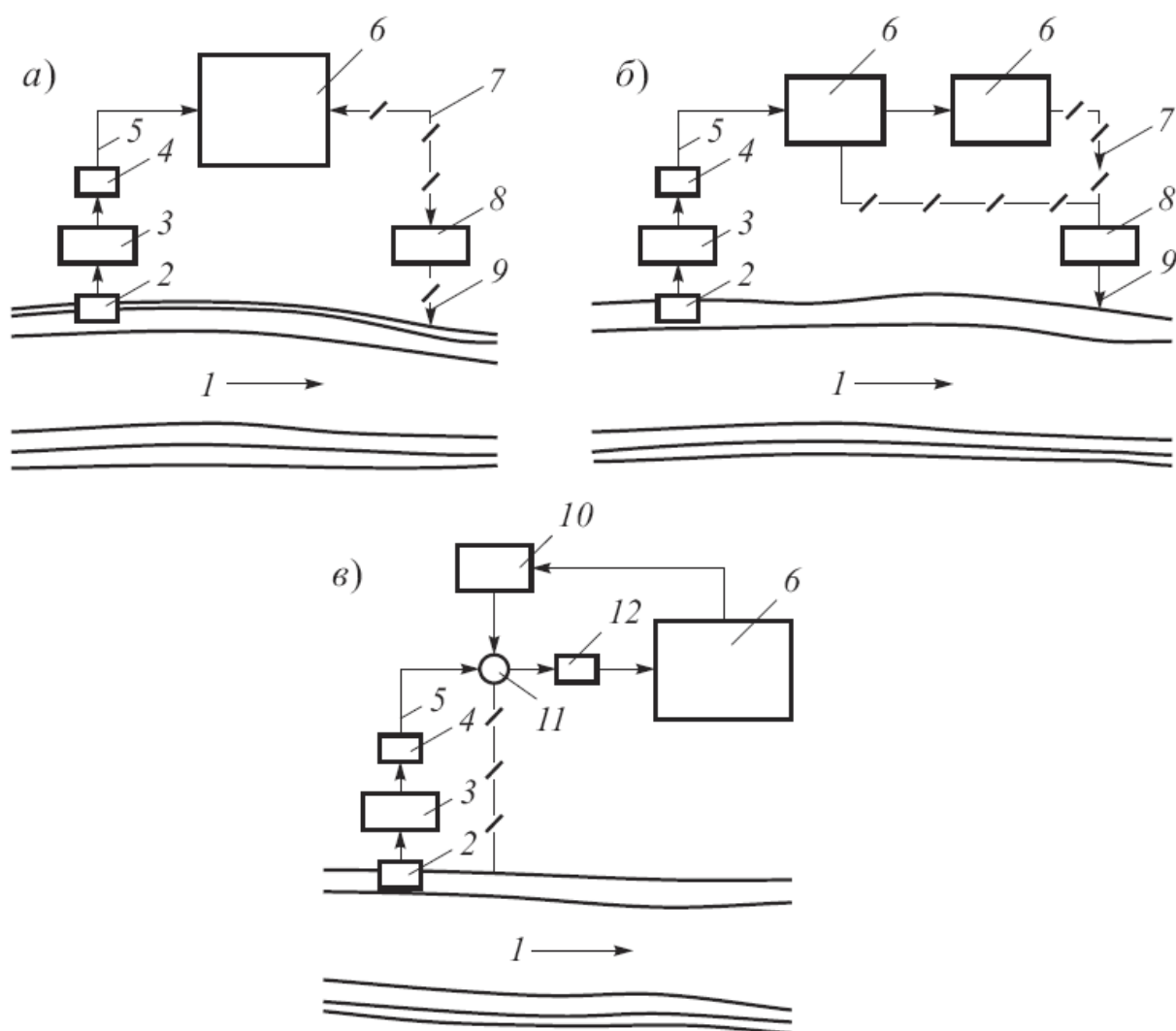


Рис. 1.3. Схемы производственного водоснабжения:

а – прямоточная; б – с повторным использованием воды; в – оборотная;

1 – река; 2 – водозаборное сооружение; 3 – очистные водопроводные сооружения; 4 – насосная станция II подъема; 5 – водоводы; 6 – промышленное предприятие; 7 – сброс отработанной воды; 8

– станция очистки сточных вод; 9 – сброс воды в реку; 10 – водоохлаждающее устройство; 11 – сборный резервуар; 12 – насосная станция оборотной воды

При прямоточной схеме (рис. 1.3, а) из водного источника забирается все необходимое для водопотребителей количество воды. Отработанная вода сбрасывается обратно в водный объект. По мере роста производства на предприятии растет и водопотребление, при этом требуемое количество воды может превышать дебит водоисточника. Увеличивающийся сброс отработанных вод в водоем требует расходования больших средств на их очистку. Поэтому более перспективным является путь уменьшения расходов забираемой из водоема и сбрасываемой в него воды.

Система повторного использования воды (рис. 1.3, б) представляет собой такую систему водного хозяйства, в которой свежая вода, пройдя технологический цикл на одном из производств, участвует в технологическом процессе другого производства. Для применения схемы повторного использования воды необходимо, чтобы отработанная вода по количеству и качеству удовлетворяла требованиям технологического процесса второго потребителя. Применение такой схемы позволяет сократить суммарный расход свежей воды из водоисточника. Она может рассматриваться как усовершенствованная прямоточная система, когда источник водоснабжения не может полностью обеспечить необходимый расход воды.

С целью сокращения забора свежей воды из источников водоснабжения и защиты их от загрязнений широкое применение находят оборотные системы водоснабжения (рис. 1.3, в). В таких системах вода после участия в технологическом процессе не сбрасывается в водоем, а подвергается обработке и вновь возвращается на предприятие. Потери, имеющие место в производстве, восполняются из источника.

Все системы, использующие воду в обороте, подразделяют на локальные, централизованные и смешанные. В локальных системах вода после восстановления потребительских свойств используется в обороте одного или

последовательно в нескольких технологических процессах. В централизованных оборотных системах вода после различных операций проходит обработку единым потоком, после чего возвращается в производство.

При смешанном водоснабжении воды одной оборотной системы используются в другой оборотной системе. Например, из охлаждающей системы вода поступает в экстрагенную, из экстрагенной системы в транспортирующую. Если оборотная система работает без какого-либо сброса оборотной воды в источник, то она является замкнутой. Вода из источника поступает в нее только для восполнения потерь. Замкнутые системы – наиболее экологически чистые системы.

В зависимости от изменения качества воды в процессе ее использования оборотное водоснабжение подразделяется на:

- 1) «чистые циклы» – для воды, которая при использовании только нагревается;
- 2) «грязные циклы» – для воды, которая только загрязняется;
- 3) «смешанные циклы» – для воды, которая при использовании одновременно и нагревается, и загрязняется.

Дефицит пресной воды требует кардинального изменения технологических схем производства, широкого внедрения маловодных и безводных схем, а также создания замкнутых безотходных производственных циклов.

Рациональные системы использования воды разрабатываются на основе научно обоснованных требований к качеству воды, используемой в каждом технологическом процессе, и совершенствования этих процессов. Создание замкнутых систем возможно при соблюдении следующих принципов в водоснабжении, канализации и очистке вод:

- водоснабжение и канализация должны рассматриваться в едином комплексе, когда на предприятии создается единая система водного хозяйства, включающая водоснабжение, канализацию и очистку воды;

- в водоснабжении вместо свежей воды в основном используются очищенные производственные и городские сточные воды, а также

поверхностный сток. Свежая вода из источников может использоваться только для особых целей и восполнения потерь;

– методы и технологии, применяемые для очистки воды и восстановления ее потребительских качеств, а также для очистки промывных вод и технологических растворов, должны обеспечивать одновременное извлечение из воды ценных компонентов при минимальных затратах.

В самом общем виде замкнутая система водного хозяйства промышленного предприятия включает в себя:

- 1) локальные оборотные (замкнутые) системы;
- 2) централизованные (замкнутые) системы;
- 3) охлаждающие локальные (централизованные) оборотные (замкнутые) системы;
- 4) системы последовательного использования воды в нескольких технологических операциях с передачей воды из одной оборотной системы в другую.

Техническое совершенство системы оборотного водоснабжения предприятия может быть оценено коэффициентом использования оборотной воды:

$$K_{об} = \frac{Q_{об}}{Q_{об} + Q_{св}}. \quad (1.6)$$

Рациональность использования воды, забираемой из источника, может быть охарактеризована коэффициентом ее использования:

$$K_{св} = \frac{Q_{св} - Q_{об}}{Q_{св}}, \quad (1.7)$$

где $Q_{об}$ – количество оборотной воды, м³/ч; $Q_{св}$ – количество свежей воды, забираемой из источника, м³/ч; $Q_{сб}$ – количество сточных вод, сбрасываемых в водоем, м³/ч.

Очевидно, что для замкнутых систем водного хозяйства $K_{св} = 1$, а для оборотной системы значения $K_{об}$ и $K_{св}$ – меньше единицы. В настоящее время в целом ряде отраслей промышленности (химической, нефтехимической, черной

металлургии и др.) коэффициент использования оборотной воды достигает весьма высоких значений, составляя 0,85 – 0,9.

В современных условиях разрабатываются и создаются замкнутые системы водного хозяйства промышленных комплексов и районов. В таких системах предусматривается использование сточных вод и поверхностных стоков на промышленных предприятиях, для обводнения водоемов; для полива местных лесных насаждений. Они исключают образование каких-либо отходов и сброс отработанных вод в водоемы.

1.2.2. Определение расходов воды и составление водного баланса промышленного предприятия

Для систем водоснабжения промышленных предприятий (оборотных систем) рекомендуется составлять баланс воды, включающий различные потери, сбросы (продувку) и необходимое добавление компенсирующих расходов воды в систему. Поступление воды в систему осуществляется не только от источников водоснабжения («свежая вода») и после повторного ее использования, но также с исходным сырьем и полуфабрикатами, со вспомогательными веществами (топливом, реагентами и т.п.), с атмосферными осадками, в виде шахтного или рудничного водоотлива, а также подземной (дренажной) воды, инфильтрационной воды и др.

Общий дефицит воды в системах водоснабжения складывается из расходов на безвозвратное потребление (унос с готовыми продуктами и отходами); мойку полов; полив проездов и насаждений; испарения в охладителях оборотной воды; унос с воздухом в виде капель из охладителей оборотной воды; естественное испарение с водной поверхности; транспирацию растительностью в водоемах; фильтрацию из системы в почву; сброс оборотной воды в водоемы при ухудшении ее качества (продувка); сброс сточных вод в водоем.

Количество воды в системе оборотного водоснабжения поддерживается постоянным. Убыль воды из системы возмещается добавочной водой, т.е. в системе поддерживается баланс между убываемой и добавочной водой.

Упрощенная балансовая схема промышленного предприятия показана на рис. 1.4 и описывается следующими уравнениями:

- всего воды свежей из источника:

$$Q_{\text{св.в}}^{\text{год}} = Q_{\text{техн}}^{\text{год}} + Q_{\text{пр.п}}^{\text{год}} + Q_{\text{х/б}}^{\text{год}} = Q_{\text{ст}}^{\text{год}} + Q_{\text{бп}}^{\text{год}}; \quad (1.8)$$

- всего сточных вод:

$$Q_{\text{ст}}^{\text{год}} = Q_{\text{ст.пр}}^{\text{год}} + Q_{\text{ст.быт}}^{\text{год}} + Q_{\text{ст.б/о}}^{\text{год}} + Q_{\text{ст.шл}}^{\text{год}}; \quad (1.9)$$

- полный расход на производство продукции:

– при оборотной системе:

$$Q_{\text{полн}}^{\text{год}} = Q_{\text{св.в}}^{\text{год}} + Q_{\text{об}}^{\text{год}}, \quad (1.10)$$

– при прямоточной системе:

$$Q_{\text{полн}}^{\text{год}} = Q_{\text{св.в}}^{\text{год}}, \quad (1.11)$$

где $Q_{\text{полн}}^{\text{год}}$ – полный расход на производство продукции; $Q_{\text{об}}^{\text{год}}$ – расход оборотной воды; $Q_{\text{св.в}}^{\text{год}}$ – всего свежей воды из источника на технические и хозяйственно-бытовые нужды; $Q_{\text{техн}}^{\text{год}}$ – расход технической воды (свежей из источника); $Q_{\text{пр.п}}^{\text{год}}$ – расход воды для производственных целей (свежей из источника, питьевой); $Q_{\text{х/б}}^{\text{год}}$ – расход воды для хозяйственно-бытовых целей (свежей из источника, питьевой); $Q_{\text{ст.пр}}^{\text{год}}$ – производственные сточные воды; $Q_{\text{ст.быт}}^{\text{год}}$ – бытовые сточные воды; $Q_{\text{ст.б/о}}^{\text{год}}$ – сточные воды, не требующие специальной очистки; $Q_{\text{ст.шл}}^{\text{год}}$ – фильтрационные воды из шламонакопителя; $Q_{\text{ст}}^{\text{год}}$ – всего сточной воды; $Q_{\text{б.п}}^{\text{год}}$ – безвозвратные потери.

Безвозвратное потребление воды в производстве и потери в местах ее использования определяются технологическим расчетом и могут быть вычислены как разность количеств подаваемой и отводимой от производства воды:

$$Q_{\text{б.п}}^{\text{год}} = Q_{\text{св.в}}^{\text{год}} - Q_{\text{ст}}^{\text{год}}. \quad (1.12)$$

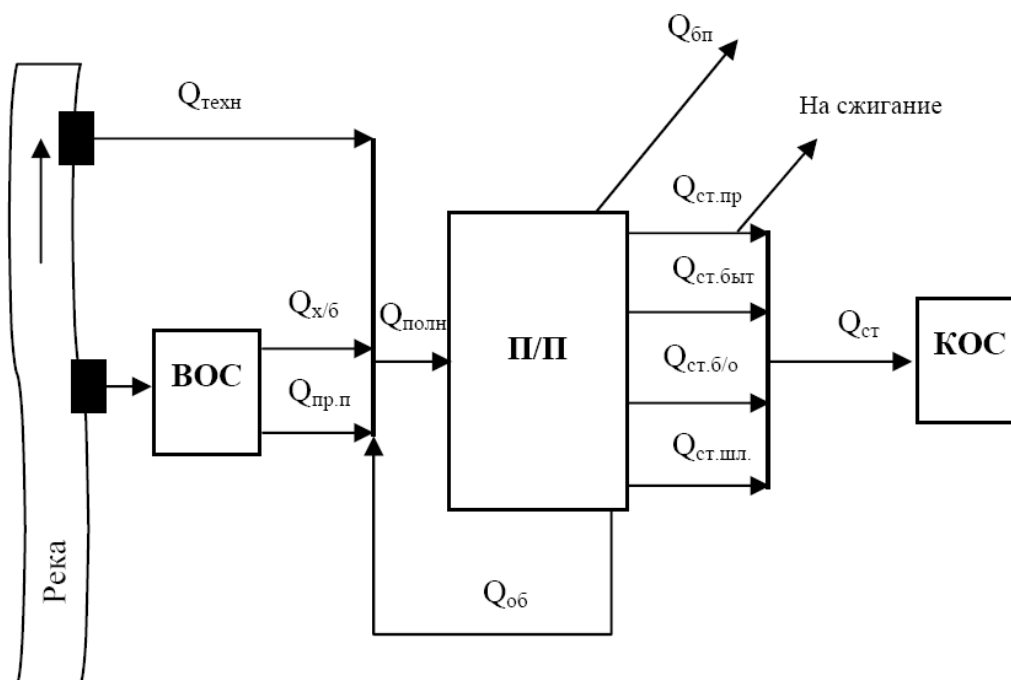


Рис. 1.4. Полная водобалансовая схема промышленного предприятия

1.3. Особенности водоснабжения предприятий различных отраслей промышленности

Водопотребление в теплоэнергетике

Почти 50% воды, забираемой промышленными предприятиями из природных водоисточников, потребляет теплоэнергетика. Основным потребителем воды на тепловой электростанции являются конденсаторы паровой турбины. Кроме того, охлаждающая вода требуется для: воздухоохладителей и газоохладителей обмоток генераторов, воздухоохладителей питательных насосов и возбуждателей генераторов, маслоохладителей систем смазки механизмов. Обмотки электрогенераторов охлаждаются воздухом или газом (водородом), который циркулирует в замкнутом цикле системы вентиляции и охлаждается водой. Расход воды, подаваемой на воздухо- или газоохладители генераторов, составляет 1–2% общего расхода охлаждающей воды на электростанции.

Пар для паровых турбин вырабатывается в котлах (рис. 1.5). На атомных электростанциях роль котлов выполняют атомные реакторы. На

конденсационной теплоэлектростанции (см. рис. 1.5) пар из парового котла 1 поступает в турбину 2, которая приводит в действие электрический генератор 3. Отработанный пар после турбины направляется в конденсатор 4, в который также подается охлаждающая вода циркуляционным насосом 5, в результате чего пар конденсируется. Конденсат перекачивается в бак 7 питательной воды конденсатным насосом 6. В этот же бак подается добавочная химически очищенная и обессоленная вода для восполнения потерь. В паровой котел вода подается из бака 7 питательным насосом 8.

КПД паровой турбины можно увеличить, повысив температуру и давление пара, поступающего в турбину, или снизив давление и температуру пара на выходе из турбины.

Системы водоснабжения ответственных потребителей на тепловых станциях проектируются оборотными. В качестве охладителей применяются брызгальные бассейны, водохранилища-охладители, градирни.

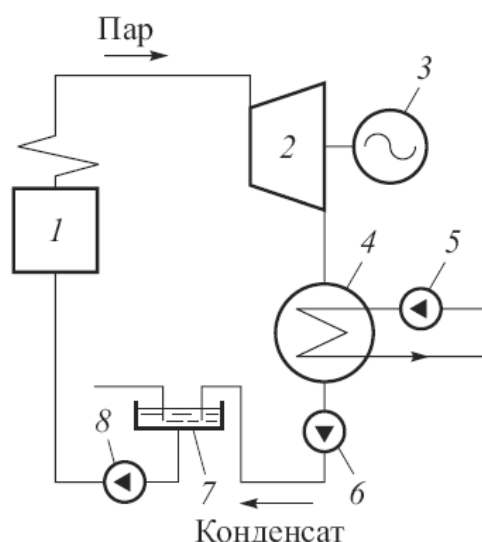


Рис. 1.5. Технологическая схема конденсационной тепловой электростанции:

1 – паровой котел; 2 – турбина; 3 – генератор; 4 – конденсатор; 5 – циркуляционный насос; 6 – конденсатный насос; 7 – бак питательной воды; 8 – питательный насос

Электростанции, работающие на твердом топливе, оборудуют установками для улавливания золы из дымовых газов. В некоторых случаях в качестве золоулавливателей применяют мокрые скрубберы.

Удаление шлака из-под котлов и золы из золоулавливателей на большинстве электростанций производится гидравлическим способом. Расходы воды для удаления шлаков зависят от вида топлива, способа его сжигания, механических свойств золы и шлака. Для нужд систем гидроудаления используют воду, прошедшую через конденсаторы, а также воду, сбрасываемую после охлаждения подшипников.

На смыв 1 т шлака требуется от 20 до 40 м³ воды, а на смыв 1 т золы – 12 м³ воды. Шлак и зола смешиваются с водой, транспортируются самотеком или с помощью побудительных сопел к насосам, которые перекачивают пульпу на золоотвалы. При раздельном удалении золы и шлаков золовая пульпа перекачивается шламовыми насосами. Если золоотвалы располагаются ниже котельной, пульпа к ним транспортируется самотеком.

Золо- и шлакоотвалы проектируют как пруды-отстойники непрерывного действия. Их организуют большей частью на участках земли вблизи электростанций, например, в оврагах. Пруд образуется путем перегораживания оврага земляной дамбой или обваловывания равнинного участка. В этот пруд сбрасывают золовую пульпу. Зола и шлак осаждаются в пруде, а осветленная вода возвращается в котельную электростанции с целью повторного использования для гидротранспорта золошлаков.

Вода для питания паровых котлов специально готовится на станции ХВО (химводоочистки). Она является глубоко умягченной и обессоленной водой, не содержащая силикат-ионов. Для глубокого умягчения и обессоливания воды используются технологии ионного обмена, обратного осмоса и электродеионизации. Химически обессоленная вода идет для восполнения потерь питательной воды котлов (подпитки). Количество воды, требующейся для подпитки котлов на конденсатных электростанциях, составляет от 1 до 2% расхода пара.

На крупных ТЭЦ производимый пар отбирается на нужды промышленных предприятий, для чего требуется значительно большее количество воды для подпитки паровых котлов. Кроме того, на ТЭЦ производится умягченная вода,

подаваемая на горячее водоснабжение городов и для целей отопления жилых застроек (вода для подпитки теплосетей).

Для обеспечения электростанций требуемыми расходами воды необходимы крупные сооружения, поэтому для строительства электростанций выбирают места вблизи водных источников, что, в свою очередь, часто приводит к строительству электростанций вдали от потребителей электроэнергии и источников тепла. На ТЭС, располагаемых вблизи потребителей тепла в крупных городах, широко применяют системы оборотного водоснабжения с испарительными градирнями.

На ТЭС кроме технического водоснабжения предусматривается система противопожарного водоснабжения со стационарными автоматическими установками водопенного пожаротушения, а также система хозяйственно-питьевого водоснабжения.

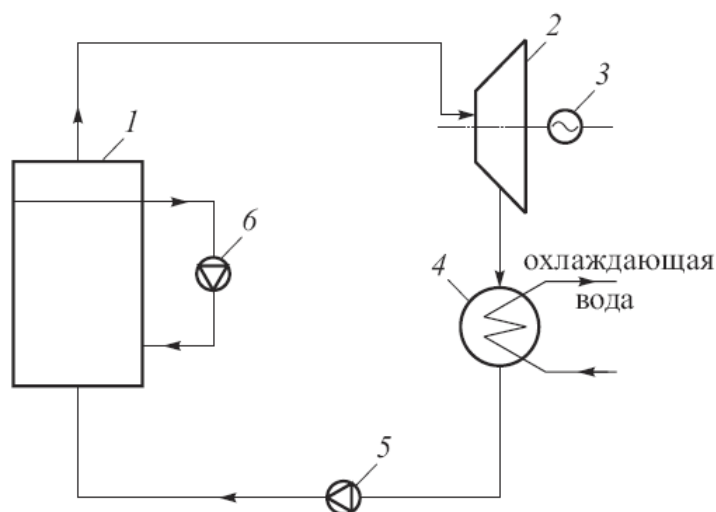


Рис. 1.6. Технологическая схема одноконтурной АЭС:

1 – реактор; 2 – турбина; 3 – генератор; 4 – конденсатор; 5 – питательный насос; 6 – циркуляционный насос

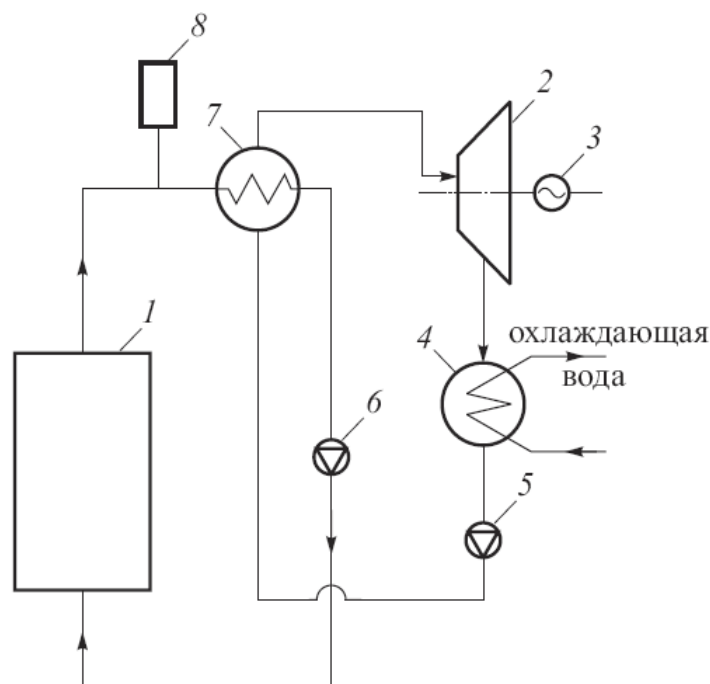


Рис. 1.7. Технологическая схема двухконтурной АЭС:

1 – реактор; 2 – турбина; 3 – генератор; 4 – конденсатор; 5 – питательный насос; 6 – циркуляционный насос; 7 – конденсатор; 8 – парогенератор

На современных АЭС в качестве теплоносителя и рабочего тела используется вода. Поэтому водное хозяйство атомной станции содержит все необходимые элементы для надежной и безопасной работы реактора и паровых турбин. В одноконтурных АЭС (см. рис. 1.6) теплоноситель испаряется и пар используется в турбинах для выработки электроэнергии. В двухконтурных АЭС (см. рис. 1.7) теплоносителем является глубоко обессоленная вода, которая, контактируя с ТВЭлами, образует пар. Пар первого контура нагревает теплоноситель второго контура (подается в парогенераторы). Пар второго контура вращает турбины, конденсат после турбин подается во второй контур.

Техническое водоснабжение атомной станции включает в себя системы для заполнения и подпитки контуров, а также системы для охлаждения оборудования. Атомные станции в больших количествах потребляют охлаждающую воду, поскольку от многих агрегатов АЭС, как основных, так и вспомогательных, а также из отдельных ее помещений необходимо отводить большое количество теплоты. В атомной энергетике применяют турбины насыщенного пара. По сравнению с турбинами ТЭС, работающими при

невысоких давлениях, в турбины и конденсаторы АЭС поступают вдвое большие расходы пара. Поэтому при одинаковой кратности охлаждения для АЭС требуются значительно бóльшие, чем для ТЭС, расходы циркуляционной охлаждающей воды.

В связи с большими расходами охлаждающей воды ее химическую обработку не производят, ограничиваясь грубой механической очисткой и хлорированием для предотвращения биообрастаний. Химически неочищенную воду, используемую для охлаждения, называют технической водой, а отдельные системы охлаждения и водоснабжения, объединенные в единую, – системой технического водоснабжения. Надежность и экономичность работы АЭС во многом зависят от системы технического водоснабжения. Основными потребителями охлаждающей воды на АЭС являются: конденсаторы паровых турбин, маслоохладители и воздухоохладители турбогенераторов, подшипники насосов и других вспомогательных агрегатов, теплообменники вентиляционных систем, расхолаживания реактора, автономных контуров главных циркуляционных насосов, охладители проб воды и пара, отбираемых для анализа.

Кроме охлаждения техническая вода используется для приготовления добавочной воды для заполнения контуров и всех систем энергоблоков. Вода также расходуется на подпитку теплосети, хозяйственно-бытовые нужды (для санпропускников, прачечных) и др.

В ряде случаев в качестве охлаждающей воды используют морскую воду. Ее применение возможно лишь для конденсаторов, а также масло- и газоохладителей. Система водоподготовки, подпитка теплосети, снабжение санитарно-бытовых устройств производятся из другого источника водоснабжения. В систему технического водоснабжения входят охладительные устройства, насосные станции, подводящие каналы, гидротехнические сооружения (для приема и выпуска воды) и др.

Системы охлаждения могут проектироваться оборотными. Оборотные системы охлаждения сооружаются с прудами-охладителями (водохранилищами), брызгальными бассейнами или градирнями.

Развитие тепловой и атомной энергетики и увеличение объемов их сбросных вод приводят к тепловому загрязнению водоемов, а в дальнейшем – к эвтрофикации. При проектировании новых ТЭС предусматриваются только оборотные системы водяного охлаждения.

Для сокращения сброса продувочных вод оборотных систем водяного охлаждения их повторно используют на технические цели станций: для питания котлов, подпитки теплосетей, на восполнение потерь в оборотных системах гидрозолоудаления, полива территорий электростанций, сельскохозяйственных угодий и хозяйственных нужд.

Серьезную экологическую проблему представляют сточные воды станций химводоочистки (ХВО) – минерализованные стоки регенерационных растворов ионообменных установок, применяемых для подготовки питательной воды котлов. В настоящее время на станциях ХВО применяют экологически чистые мембранные методы водоподготовки (обратный осмос, электродеионизация), не требующие химических реагентов и не имеющие минерализованных стоков.

Водоснабжение в черной металлургии

Вода является таким же необходимым компонентом металлургического производства, как руда и коксующиеся угли, и используется на всех этапах производства чугуна и стали. На металлургических заводах с полным технологическим циклом выплавляют чугун и сталь. Из стали выпускают трубы и различные виды проката. На современном металлургическом комбинате имеются коксохимические, огнеупорные, агломерационные, сталеплавильные, ферросплавные, трубопрокатные, метизные и другие производства, а также теплоэлектростанции, паровоздуховные станции и другие вспомогательные цеха.

Системы водного хозяйства металлургических комбинатов обеспечивают производственные, противопожарные и хозяйственно-бытовые нужды потребителей и разрабатываются в соответствии с основными принципами проектирования систем общего и производственного водоснабжения промышленных предприятий. Они включают водозаборные сооружения, водоводы, разводящие сети, системы противопожарного водопровода, шламонакопители и хвостохранилища, сооружения для охлаждения и очистки оборотных вод, циркуляционные насосные станции, очистные сооружения ливневых стоков. Для выплавки 1 т металла на металлургическом комбинате с полным циклом расходуется около 300–350 м³ воды.

Основное количество воды на металлургических комбинатах (до 75%) расходуется на охлаждение доменных, сталеплавильных и нагревательных печей, а также на нужды воздуходувных и электрических станций. Остальная часть воды расходуется на охлаждение оборудования и продукции (металлопроката), а также на гидротранспорт механических примесей и прочие нужды.

Требования к качеству воды, подаваемой на производственные нужды, зависят от технологии производства и определяются такими параметрами, как: температура, содержание взвешенных веществ и их фракционный состав, наличие солей жесткости.

В зависимости от технологических требований к качеству воды и особенностей производства можно выделить несколько групп потребителей воды:

1. Доменные и коксовые печи, нагревательные печи прокатного производства, электроплавильные и мартеновские печи, конвертеры, конденсаторы паровоздуходувных станций (ПВС) и теплоэлектростанций (ТЭС), компрессорные и кислородные станции.

2. Кристаллизаторы установок непрерывной разливки стали.

3. Установки по очистке загрязненных газов доменного, сталеплавильного и агломерационного производств.

4. Установки гидротранспорта отходов металлургического производства: золы, шлака, окалины.

5. Установки кондиционирования воздуха и санитарно-технические устройства, требующие воды питьевого качества.

Водоснабжение предприятий цветной металлургии

Цветная металлургия объединяет много разнородных производств. Помимо производств алюминия, меди, свинца, цинка и других металлов к цветной металлургии относится ряд предприятий горно-обогатительной промышленности, а также заводы по переплавке металлов, заводы по производству литейных заготовок.

К наиболее важным группам водопотребителей на предприятиях цветной металлургии относятся:

- системы испарительного охлаждения пирометаллургических агрегатов;
- котельные установки;
- системы проточного охлаждения пирометаллургических агрегатов и гидromеталлургических аппаратов;
- охлаждающие системы энергетических установок;
- устройства охлаждения трущихся узлов механического оборудования;
- устройства гидропылеподавления и гидросмыва;
- мойка автотранспорта и погрузочно-разгрузочных машин;
- устройства для мокрого бурения; устройства для дробления и измельчения полезных ископаемых;
- гидротранспорт;
- устройства для гравитационного обогащения;
- флотационные машины;
- устройства для сорбционного и экстракционного обогащения;
- электролитные и другие гидromеталлургические цеха;
- грануляционные установки;

- устройства для мокрой очистки металлургических газов и грануляционных выбросов;
- системы охлаждения прокатных и волочильных станов;
- системы приготовления электролитов, травильных и обезжиривающих растворов.

В процессе производства алюминия (методом электролиза расплава) вода используется при очистке отработанного воздуха электролизных печей, а также при очистке печных газов при разливке алюминия. При производстве меди вода используется для мокрой очистки газов (в основном сернистого газа), образующихся: при обжиге сульфидсодержащих руд, при обжиге в пламенной печи для удаления окиси железа, при переработке меди в конвекторной печи, при очистке меди методом электролиза. Также вода используется при промывке электролитических ванн.

Предприятия цветной металлургии являются источниками поступления в окружающую водную и воздушную среду различных загрязняющих веществ, в том числе и тяжелых металлов. Поэтому исключительно важной задачей является создание на предприятиях цветной металлургии высокоэффективных систем оборотного водоснабжения и замкнутых производственных циклов.

Техническое водоснабжение нефтеперерабатывающих заводов

Нефтеперерабатывающие заводы (НПЗ) являются крупнейшими потребителями воды.

Количество и качество используемой воды зависят от состава нефти (малосернистая, сернистая, высокосернистая) и глубины ее переработки, от номенклатуры выпускаемой продукции, температуры воды и степени ее подготовки. Вода на нефтеперерабатывающем заводе используется для охлаждения оборудования и нефтепродуктов, для приготовления пара, для обессоливания нефти, для промывки топлива после защелачивания, для приготовления щелочных растворов и на другие технологические цели.

Нефть подвергают дополнительному обезвоживанию и обессоливанию на специальных электрообессоливающих установках. Для обессоливания нефти используется метод, сочетающий термохимическое отстаивание с обработкой эмульсии в электрическом поле.

Сырая нефть содержит много примесей, которые способствуют созданию эмульсий с водой, а присутствие сероводорода существенно ускоряет коррозию оборудования. Термохимическое обезвоживание заключается в том, что для большей эффективности очистки в подогретую эмульсию вводятся химические препараты, называемые деэмульгаторами, способствующие разрушению эмульсии нефти с водой. В эмульсию добавляется также и содощелочной раствор, нейтрализующий агрессивное действие сероводорода и карбоновых кислот. При термохимическом обезвоживании содержание воды в нефти снижается до 0,5–1,0%, при этом из нефти удаляется значительная часть солей. Однако большинство нефтей нуждается в дополнительном обессоливании. Установки обессоливания носят название электрообессоливающих ЭЛОУ, где сочетается термохимическое отстаивание нефти с обработкой водно-нефтяной эмульсии в электрическом поле. Сущность процесса электрообессоливания нефти заключается в ее смешении с промывной водой и деэмульгатором с последующим отделением соленой воды в электродегидрататорах, где под действием переменного электрического поля высокой напряженности в сочетании с повышенной температурой водонефтяная эмульсия разрушается. Нефть, в которую вводятся промывная вода, деэмульгатор и щелочь, подается в электродегидратор первой ступени, где удаляется основная масса воды и солей и содержание их снижается в 8–10 раз. Из электродегидратора первой ступени нефть поступает в электродегидратор второй ступени для повторной обработки. Перед электродегидраторами второй ступени в нефть подается вода. Общий расход воды на обессоливание составляет до 10% от обрабатываемой нефти. На некоторых установках свежая вода подается только на вторую ступень обессоливания, а перед первой ступенью с нефтью смешиваются промывные

воды второй ступени. Это позволяет сократить расходы воды на обессоливание нефти.

Техническое водоснабжение предприятий пищевой промышленности

Пищевая промышленность насчитывает более 40 самостоятельных отраслей. По организационному и административному признакам все предприятия пищевой промышленности подразделяются на три группы:

- мясо-молочную;
- рыбную;
- предприятия, перерабатывающие растительное сырье.

Большинство пищевых производств используют водопроводную воду, соответствующую требованиям СанПиН, или артезианскую воду, которая обрабатывается на установках водоподготовки.

Вода используется для мойки сырья, для охлаждения насосов и оборудования, для производства пара, для гидротранспорта.

Традиционно на отечественных предприятиях пищевой промышленности подготовка воды осуществлялась с применением технологий ионного обмена, в последнее время для получения качественной воды используется метод обратного осмоса.

На большинстве предприятий, производящих напитки (пиво, алкогольные, безалкогольные напитки, соки, бутылированную воду), требуется умягченная вода, не содержащая железа. Для каждого вида продукции существуют отдельные требования по содержанию ионов кальция, магния, железа, по величине общего солесодержания и др.

Вода также используется в технологиях изготовления пищевых продуктов (добавляется при приготовлении мясного фарша, теста, кондитерских изделий, молочных продуктов, мороженого и др.). Для каждого вида таких производств также разработаны требования по составу воды.

На ряде пищевых производств (при производстве мясных и рыбных изделий) используется пар. Поэтому на таких производствах используются

системы водоподготовки питательной воды паровых котлов и парогенераторов. Кроме того, пар используется для нагрева и обеззараживания (регулярной обработки емкостей и трубопроводов острым паром).

Потребление воды в текстильной промышленности

В текстильной промышленности вода используется для котельных установок, для технологических нужд (варка, отбеливание, обезжиривание, крашение, прополаскивание), для подпитки контуров систем кондиционирования воздуха (для увлажнения воздуха и обеспыливания). В зависимости от производственных задач и вида продукции требования к качеству технологической воды различны. Например, для подготовки волокон для производства синтетических тканей требуется глубоко умягченная и деминерализованная вода.

УМЯГЧЕНИЕ И ОБЕССОЛИВАНИЕ ВОДЫ

2.1. Предварительная подготовка воды

2.1.1. Выбор метода водоподготовки

Для решения проблемы получения воды, соответствующей техническим требованиям предприятия, необходимо определить требуемый метод очистки и технологическую схему процесса, а затем подобрать соответствующее оборудование.

Нередко оказывается, что одна и та же проблема решается с помощью различных методов, или наоборот, одни и те же методы могут использоваться для решения разных задач. Например, ионообменные методы могут использоваться как для умягчения, так и для обессоливания. Так же и мембранные методы – обратный осмос применяется в схемах умягчения воды для котельных и в схемах обессоливания.

Для того чтобы сделать выбор между конкурентоспособными методами, необходимо проводить технико-экономическое сравнение вариантов на основании не только стоимостных характеристик, но также с учетом экологических, социальных и других факторов. Например, при экономическом сравнении учитываются не только стоимость поставки оборудования, но и строительные объемы, сроки строительства и т.д., определяющие общие капитальные затраты. При этом компактное оборудование будет иметь определенные преимущества.

Огромное значение при выборе вариантов имеют эксплуатационные затраты, такие как: потребление реагентов, типы потребляемых реагентов и химикатов, их стоимость, объемы потребления. В зависимости от местоположения объекта и наличия подъездных путей, стоимости поставки реагента могут иметь решающие значения.

Важным фактором является энергопотребление оборудования особенно в современных экономических условиях, когда стоимость электроэнергии зависит от местоположения объекта.

В настоящее время различные фирмы предлагают решение одних и тех же задач с помощью различных видов оборудования, работа которого основана на различных методах очистки воды. Важно учитывать то обстоятельство, что разные методы используются в комбинациях для достижения большего эффекта и целесообразности. Очень важно, изучив теоретические основы каждого метода, понимать его область применения (диапазоны составов исходной и очищенной воды), в которых метод наиболее эффективен и экономичен. В дальнейших главах для каждого метода даны области применения и приведены основные экономические показатели.

Необходимо наряду с экономическими факторами учитывать и экологические. У каждого метода существуют такие характеристики, как расход воды на собственные нужды, наличие сточных вод и вопросы их утилизации. В современных экологических условиях проблемы утилизации сточных вод, возможность их сброса в водоем или приема в систему канализации имеют подчас решающее значение, и имеют стоимостное выражение в виде штрафов, затрат на пользование недрами, водой из горводопровода, затрат на сброс в горканализацию и др.

Выбор метода очистки – ответственный процесс, требующий теоретических знаний, понимания сущности процесса, его возможностей и областей применения. Основные методы и технологии, принятые в промышленной водоподготовке, приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Основные методы и технологии, принятые в промышленной водоподготовке

Вид производства	Требования к исходной воде	Требуемая очистка
Вода для котлов высокого	Снижение элек-	Глубокое обессоливание

давления ТЭЦ, ГРЭС	тропроводности	методом ионного обмена или в комбинации с ме- тодом обратного осмоса
Водогрейные котлы	Снижение общей жесткости	Умягчение методом ионного обмена
Пищевая промышленность	Снижение общего солесодержания и общей жесткости	Умягчение и частичное обессоливание методом ионного обмена
Вода для приготовления ликероводочных изделий	То же	То же
Вода бутилированная	То же	То же
Вода для приготовления соков и напитков	То же	То же
Производство стекла	То же	Обессоливание методом обратного осмоса
Производство полипропилена (охл. вода)	То же	Обессоливание методом обратного осмоса
Гальваническая промыш- ленность	То же	То же
Электронная промышлен- ность (производство полу- проводниковых изделий)	То же	Глубокое обессоливание комбинацией методов ионного обмена, обратного осмоса и электродеионизации
Биологическая промышленность	То же	Обессоливание методом дистилляции или обратного осмоса
Производство лекарствен- ных препаратов	То же	То же

2.1.2. Технологии предварительной подготовки воды

По СП 124.13330.2012 качество сетевой воды нормируется по содержанию железа, взвешенных веществ, pH, растворенного кислорода и свободной углекислоты и другим показателям, а также рассчитывается карбонатный индекс для предотвращения карбонатного накипобразования:

$$И_{к_с} = Ca_c \cdot Щ_c, \quad (2.1)$$

где Ca_c и $Щ_c$ – соответственно предельно допустимые значения кальциевой жесткости и общей щелочности сетевой воды, мг-экв/дм³.

Нормативные значения $И_{к_с}$ при нагреве сетевой воды в сетевых подогревателях в зависимости от температуры и pH воды составляют от 0,4 до 4, для водогрейных водотрубных котлов – от 0,3 до 3,2.

Согласно правилам Госгортехнадзора докотловая обработка воды должна предусматриваться для всех котлов паропроизводительностью более 0,7 т/ч, для котлов, имеющих экранные поверхности нагрева, независимо от паропроизводительности и давления, для неэкранированных котлов, сжигающих высококалорийное топливо — газ и мазут, и для всех водогрейных котлов.

Для газотрубных котлов, работающих с докотловой обработкой воды, согласно ГОСТ 20995-75 общая жесткость не должна превышать при работе на жидком топливе – 0,03 мг-экв/дм³, на других видах топлива – 0,1 мг-экв/дм³.

Для водотрубных котлов, работающих на жидком топливе и при локальном тепловом потоке свыше 350 кВт/м², на входе в котел перед экономайзером общая жесткость не должна превышать при работе на давлении до 1,4 МПа – 0,015 мг-экв/дм³, до 2,4 МПа – 0,01 мг-экв/дм³, до 3,9 МПа – 0,005 мг-экв/дм³. При работе на других видах топлива и при локальном тепловом потоке до 350 кВт/м² эти нормы соответственно составляют 0,02 мг-экв/дм³, 0,015 мг-экв/дм³ и 0,01 мг-экв/дм³. Максимальная величина общего солесодержания для паровых котлов составляет от 0,2 до 1 мг/л.

2.1.3. Технологии предварительной подготовки воды

В большинстве случаев водоподготовки используются многоступенчатые (комбинированные) технологические схемы получения воды высокого качества, часто удалением солей жесткости, и всех солей. Используемые для этого процессы: ионного обмена, обратного осмоса, электродиализа, дистилляции требуют специальной подготовки исходной воды – удаление из нее коллоидных, взвешенных веществ, растворенных органических веществ. Эти загрязнения вызывают выход из строя оборудования, используемого в перечисленных выше процессах. Так, взвешенные и коллоидные вещества осаждаются в трубопроводах и на теплопередающих поверхностях, создают сопротивление в ионообменных фильтрах, осаждаются на мембранах обратного осмоса, вызывая снижение производительности мембран.

Поэтому технологии и схемы, используемые для снижения мутности и цветности воды, обычно используются на первой ступени схемы в качестве «предочистки» перед поступлением воды в оборудование для дальнейшей ее обработки – для умягчения или обессоливания.

Для снижения мутности и цветности используются различные процессы и методы, часто в комбинациях, образуя технологические схемы. Коагуляционные процессы состоят в обработке воды коагулянтами для укрепления коллоидных и взвешенных частиц и молекул растворенных органических веществ, с целью их последующего выделения из растворов. Коагуляционные процессы могут проводиться в объеме воды (объемная коагуляция) при смешении с реагентами и хлопьеобразовании.

Для очистки (осветления воды) вода после коагуляции проходит процессы осаждения и фильтрования для выделения образования взвеси.

Процесс коагуляции эффективно проводится на поверхности (хлопьев осадка, зерен загрузки фильтров). Такой процесс называется контактной коагуляцией. Для проведения контактной коагуляции используются процессы коагуляции во взвешенном слое осадка, или контактное осветление (на зернах

загрузки). Для проведения контактной коагуляции используются специальные сооружения – осветлители. Образующиеся в объеме при коагуляции хлопья осадка имеют малые размеры, поэтому для выведения их из воды используют процессы отстаивания, в результате чего хлопья осадка под действием силы тяжести оседают на дно сооружений, а вода тем самым очищается (осветляется). Отстаивание производится в специальных сооружениях – отстойниках. Отстаивание не дает полного эффекта осветления, поскольку для отстаивания и осаждения часть частиц очень малого размера требуется долгое время, и из экономических соображений создание отстойников большого размера может оказаться нецелесообразным. Поэтому часть взвеси, не осаждаемой в отстойниках (а так же в осветлителях с взвешенным осадком) задерживается с помощью процессов фильтрования. Фильтрование состоит в пропуске воды через слои песка или другой зернистой загрузки.

Поэтому технологические схемы удаления из воды мутности и цветности (осветление воды) содержат процессы смешения, коагуляции, отстаивания, фильтрования. При использовании процессов контактной коагуляции осветления в слое взвешенного осадка дополнительно после осветлителей используют фильтрование. Процесс контактной коагуляции в слое загрузки (контактный осветлитель) позволяет получить воду, содержащую взвешенные вещества не более 1 мг/л.

В практике промышленной водоподготовки (в том числе и для энергетических объектов) используются различные варианты осветлителей со слоем взвешенного осадка. Достаточно широко используются технологические схемы с использованием коридорных осветлителей ВНИИ ВОДГЕО (обычно в блоке со скорыми фильтрами). На объектах теплоэнергетики используются осветлители конструкции ВТИ или ЦНИИ-3 конструкции Е.Ф. Кургаева. Использование таких осветлителей со стандартными типоразмерами облегчает работу по подбору оборудования.

На рис. 2.1 изображен осветлитель ЦНИИ-3 конструкции Е.Ф. Кургаева, предназначенный для осветления мутных вод. В России внедрены такие

осветлители производительностью до 9000 м³/сут с диаметром в верхней части 11 м и общей высотой около 9 м.

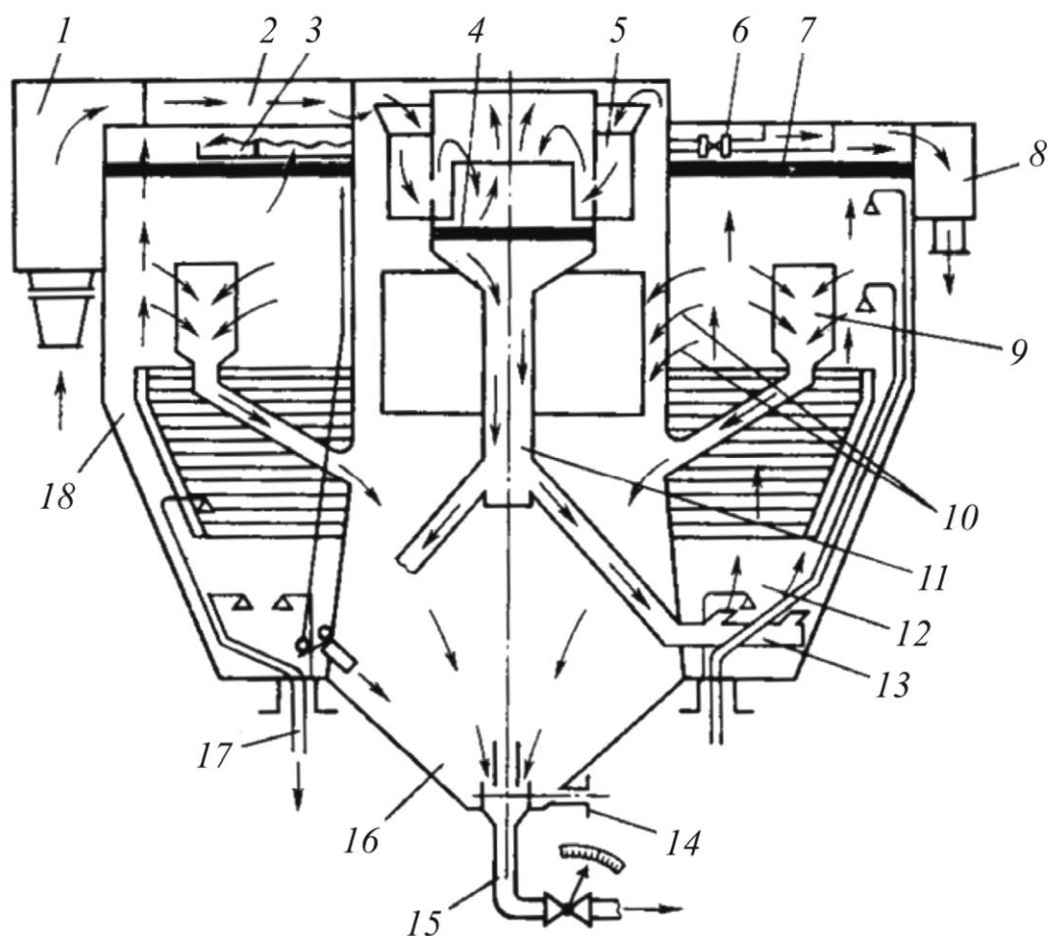


Рис. 2.1. Осветлитель ЦНИИ-3:

1, 2 – соответственно подводящий короб и лоток; 3 – желоб для сбора осветленной воды; 4 – предохранительная решетка; 5 – воздухоотделитель; 6 – отвод осветленной воды из осадкоуплотнителя; 7 – дренажная решетка; 8 – короб для отвода осветленной воды; 9 – осадкоотводящая труба; 10 – осадкоотводные окна; 11 – центральный распределительный стояк; 12 – входная коническая зона осветления; 13 – водораспределительная труба с соплами; 14 – труба периодической продувки; 15 – труба непрерывной продувки; 16 – осадкоуплотнитель; 17 – слив; 18 – выходная цилиндрическая зона

Нормальная работа осветлителя в значительной мере зависит от параметров взвешенного слоя: оптимальные значения объемной или массовой концентрации, гидравлической крупности. В целях сокращения расхода воды на сброс осадка необходимо поддерживать высокую степень его уплотнения.

На объектах теплоэнергетики при подготовке воды, поступающей в системы ионного обмена, коагуляцию воды сочетают с известкованием (умягчением известью). Вопросы известкования рассмотрены ниже. Одновременное проведение известкования и коагуляции в осветлителе позволяет осуществить снижение щелочности, жесткости и сухого остатка, удалить взвесь, снизить содержание ионов железа, кремнекислоты, органических соединений и извести. Использование известкования обеспечивает большую эффективность работы систем ионного обмена.

Дозы извести для декарбонизации воды зависят от соотношения в воде концентраций ионов кальция, магния и бикарбонатионов. В случае если концентрация в воде ионов кальция (выраженная в мг-экв/л) больше концентрации ионов HCO_3^- , то доза извести будет расходоваться на перевод ионов HCO_3^- и уголекислоты в ионы CO_3^{2-} , а также на образование гидроокиси железа при гидролизе коагулянта. После известкования в воде будут присутствовать оставшиеся ионы кальция и магния.

При умягчении в результате химических реакций образуются «тяжелые» осадки, специально для этих случаев разработаны осветлители ЦНИИ-2 (рис. 2.2). Поскольку процесс известкования ведется при высоких значениях pH (выше 9), соли алюминия в качестве коагулянта применять нельзя, так как они при высоких значениях pH образуют растворимые алюминаты. В качестве коагулянтов при известковании применяются соли железа – FeCl_3 и $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$.

В схемах водоподготовки после стандартных осветлителей используются напорные механические фильтры стандартных типоразмеров (вертикальные диаметром 700, 1000, 1500, 2000, 2600, 3000, 3400 мм, горизонтальные диаметром 3000 мм и длиной 5570 и 10500 мм). Механические фильтры, используемые для фильтрования воды после осветлителей, загружают дробленным антрацитом. Кварцевый песок не используется в качестве фильтрующей загрузки в связи с тем, что при высоких значениях pH и температуры он может обогащать воду соединениями кремниевой кислоты.

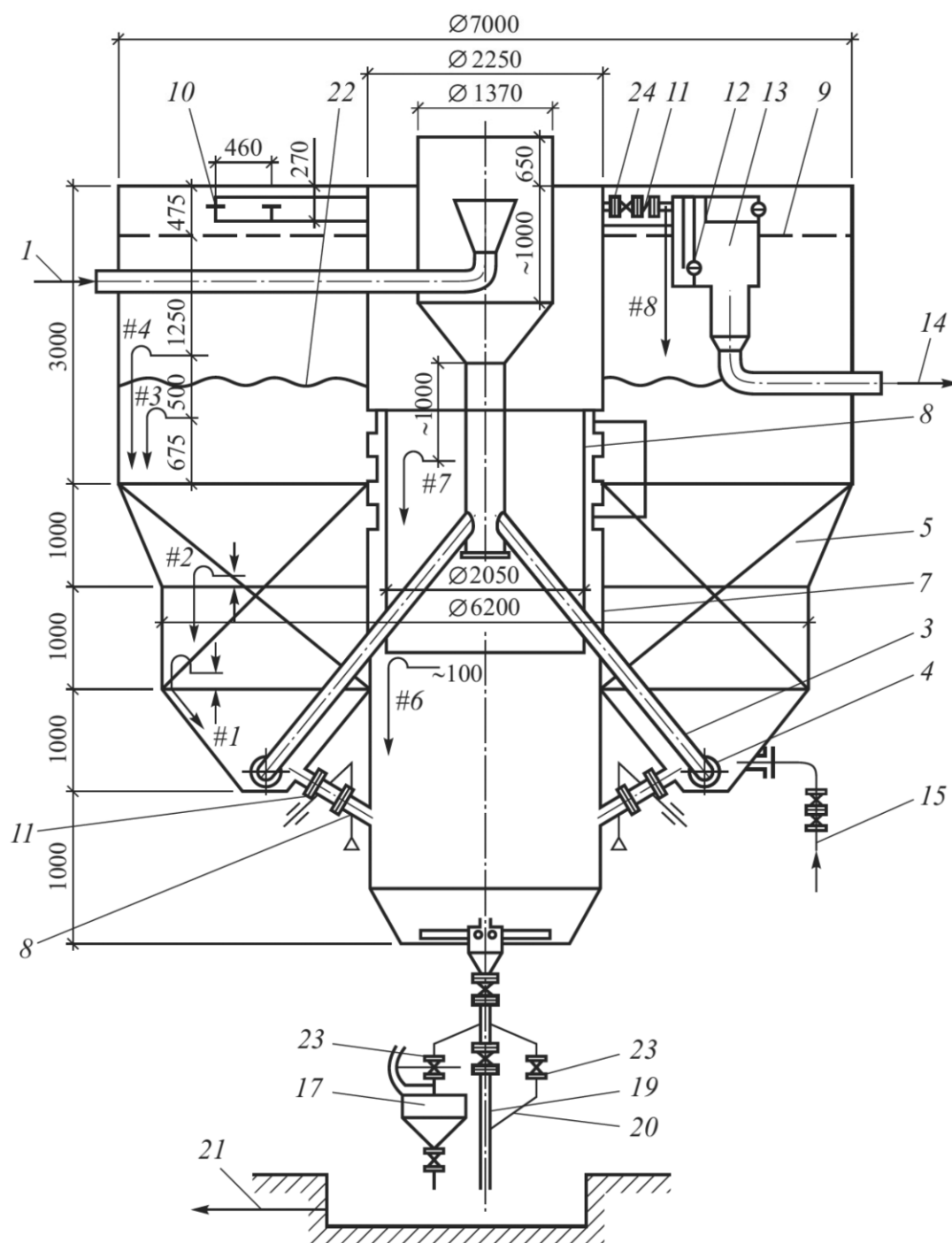


Рис. 2.2. Схема осветлителя ЦНИИ-2 производительностью 150 м³/ч:

1 – трубопровод исходной воды; 2 – воздухоотделитель; 3 – распределительная трубка; 4 – сопло; 5 – смесительная перегородка; 6 – шламоприемное окно; 7 – корпус шламоуплотнителя; 8 – внутренний «стакан» шламоуплотнителя; 9 – распределительная (дренажная) решетка; 10 – отверстие желоба; 11 – заслонка; 12 – комбинированное отверстие; 13 – приемный короб; 14 – выход воды из осветлителя; 15 – ввод раствора коагулянта; 16 – линия непрерывной продувки с ручным управлением; 17 – дренажная воронка для тарирования шкалы непрерывной продувки; 18 – линия периодической продувки осветлителя в шламоуплотнитель; 19 – дренаж шламоуплотнителя; 20 – линия автоматической продувки шламоуплотнителя с помощью сервопривода и сигнализатора

уровня осадка (СУШ); 21 – дренажный канал; 22 – верхняя граница взвешенного осадка; 23 – пробковый кран; 24 – задвижка

В последнее время для проведения осветления воды используют мембранные процессы – ультрафильтрации и нанофильтрации. Ультрафильтрационные мембраны с размером пор 0,1 – 0,01 мкм задерживают бактерии, взвешенные и коллоидные вещества. Для эффективного снижения цветности в исходную воду дозируют коагулянт. Благодаря процессу коагуляции на поверхности мембран осаждаются крупные хлопья, создающие «рыхлый» осадок, обладающий малым гидравлическим сопротивлением.

2.2. Умягчение воды

2.2.1. Теоретические основы умягчения воды, классификация методов

Под умягчением воды подразумевается процесс удаления из нее катионов жесткости, т.е. кальция и магния. Умягчение воды осуществляют методами: термическими, основанными на нагревании воды, ее дистилляции или вымораживании; реагентными, при которых находящиеся в воде ионы Ca^{2+} и Mg^{2+} связывают различными реагентами в практически нерастворимые соединения; ионного обмена, основанного на фильтровании умягчаемой воды через специальные материалы, обменивающие входящие в их состав ионы Na^+ или H^+ на ионы Ca^{2+} и Mg^{2+} , содержащиеся в воде; диализа; комбинированным, представляющим собой различные сочетания перечисленных методов.

Умягчение воды производят в основном при ее подготовке для технических целей: так отдельные виды производств требуют глубокого умягчения технической воды (до 0,05...0,01 мг-экв/л), а жесткость воды для питания барабанных котлов не должна превышать 0,005 мг-экв/л. Глубоко умягченная, обессоленная или деионизованная вода требуется в химических производствах, для отмывки изделий в различных отраслях промышленности, в медицине.

Выбор метода умягчения воды определяется ее качеством, необходимой глубиной умягчения и технико-экономическими соображениями. В соответствии с рекомендациями СП при умягчении на хозяйственно-питьевые нужды следует применять реагентные методы (известковый или известково-содовый) и метод частичного Na-катионирования. Основные характеристики и условия применения методов умягчения воды приведены в табл. 2.2.

При необходимости частичного умягчения воды обычно умягчают ее некоторую часть с последующим смешением с исходной водой, при этом количество умягчаемой воды Q_y , определяют по формуле

$$Q_y = \frac{Ж_{oi} - Ж_{oc}}{Ж_{oi} - Ж_{oy}}, \quad (2.2)$$

где $Ж_{oi}$ – общая жесткость исходной воды; $Ж_{oc}$ – общая жесткость воды, поступающей в сеть; $Ж_{oy}$ – общая жесткость умягченной воды, мг-экв/л.

Таблица 2.2

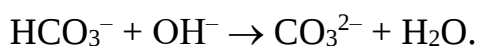
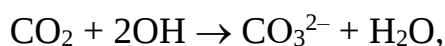
Показатель	Методы умягчения воды			
	Термический	Реагентный	Ионообменный	Диализ
Характеристика процесса	Воду нагревают до температуры выше 100°C, при этом удаляется карбонатная и некарбонатная жесткости (в виде карбоната кальция, гидроксида магния и гипса)	В воду добавляют известь, устраняющую карбонатную и магниевую жесткость, а также соду, устраняющую некарбонатную жесткость	Умягчаемая вода пропускается через катионитовые фильтры	Исходная вода фильтруется через полупроницаемую мембрану
Назначение метода	Устранение карбонатной жесткости из воды, употребляемой для питания котлов низкого и среднего давления	Неглубокое умягчение при одновременном осветлении воды от взвешенных веществ	Глубокое умягчение воды, содержащей незначительное количество взвешенных веществ	Глубокое умягчение воды

Расход воды на собственные нужды	—	Не более 10%	До 30% и более пропорционально жесткости исходной воды	10
Условия эффективно применения:				
Мутность исходной воды, мг/л	До 50	До 500	Не более 8	До 2,0
Жесткость воды, мг-экв/л	Карбонатная жесткость с преобладанием $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ некарбонатная жесткость в виде гипса	5...30	Не выше 15	До 10,0
Остаточная жесткость воды, мг-экв/л	Карбонатная жесткость до 0,035, CaSO_4 до 0,70	До 0,70	0,03...0,05 при одноступенчатом и до 0,01 при двухступенчатом катионировании	0,01 и ниже
Температура воды, °С	До 270	До 90	до 30 (глауконит), до 60 (сульфоугли)	До 60

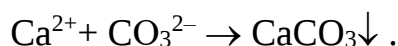
2.2.2. Реагентные и термохимические методы умягчения

Умягчение воды реагентными методами основано на обработке ее реагентами, образующими с кальцием и магнием малорастворимые соединения: $\text{Mg}(\text{OH})_2$, CaCO_3 , $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ и другие с последующим их отделением в осветлителях, тонкослойных отстойниках и осветлительных фильтрах. В качестве реагентов используют известь, кальцинированную соду, гидроксиды натрия и бария и другие вещества.

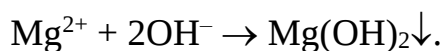
Умягчение воды известкованием применяют при ее высокой карбонатной и низкой некарбонатной жесткости, а также в случае, когда не требуется удалять из воды соли некарбонатной жесткости. В качестве реагента используют известь, которую вводят в виде раствора или суспензии (молока) в предварительно подогретую обрабатываемую воду. Растворяясь, известь обогащает воду ионами OH^- и Ca^{2+} , что приводит к связыванию растворенного в воде свободного оксида углерода (IV) с образованием карбонатных ионов и переходу гидрокарбонатных ионов в карбонатные:



Повышение в обрабатываемой воде концентрации ионов CO_3^{2-} и присутствие в ней ионов Ca^{2+} с учетом введенных с известью приводит к повышению произведения растворимости и осаждению малорастворимого карбоната кальция:



При избытке извести в осадок выпадает и гидроксид магния:



Для ускорения удаления дисперсных и коллоидных примесей и снижения щелочности воды одновременно с известкованием применяют коагуляцию этих примесей сульфатом железа (II), т.е. $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$. Остаточная жесткость умягченной воды при декарбонизации может быть получена на 0,4...0,8 мг-экв/л больше некарбонатной жесткости, а щелочность 0,8...1,2 мг-экв/л. Доза извести D_u определяется соотношением концентрации в воде ионов кальция и карбонатной жесткости:

а) при соотношении $[\text{Ca}^{2+}]/20 < J_k$,

$$D_u = 28 \left(\frac{[\text{CO}_2]}{22} + 2J_k - \frac{[\text{CO}^{2+}]}{20} + \frac{D_k}{e_k} + 0,5 \right), \quad (2.3)$$

б) при соотношении $[\text{Ca}^{2+}]/20 > J_k$,

$$D_u = 28 \left(\frac{[\text{CO}_2]}{22} + \mathcal{J}_k - \frac{[\text{CO}^{2+}]}{20} + \frac{D_k}{e_k} + 0,3 \right), \quad (2.4)$$

где $[\text{CO}_2]$ – концентрация в воде свободного оксида углерода (IV), мг/л; $[\text{Ca}^{2+}]$ – концентрация ионов кальция, мг/л; $\mathcal{J}_k$ – карбонатная жесткость воды, мг-экв/л; D_k – доза коагулянта (FeSO_4 или FeCl_3 в пересчете на безводные продукты), мг/л; e_k – эквивалентная масса активного вещества коагулянта, мг/мг-экв (для FeSO_4 $e_k = 76$, для FeCl_3 $e_k = 54$); 0,5 и 0,3 – избыток извести для обеспечения большей полноты реакции, мг-экв/л.

Выражение D_k/e_k берут со знаком минус, если коагулянт вводится раньше извести, и со знаком плюс, если совместно или после.

При отсутствии экспериментальных данных дозу коагулянта находят из выражения

$$D_k = 3(C)^{1/3}, \quad (2.5)$$

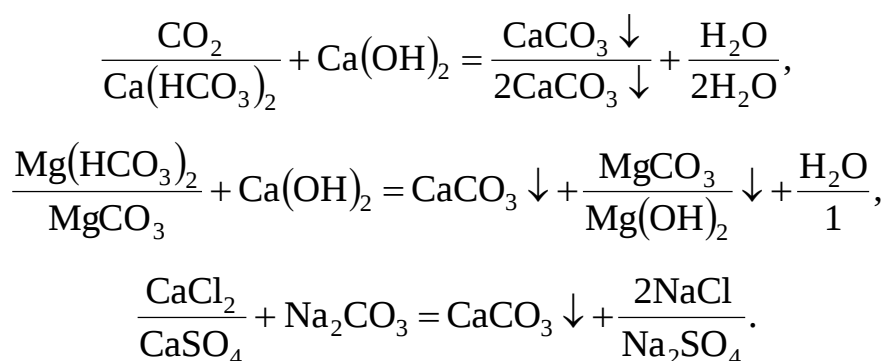
где C – количество взвеси, образующейся при умягчении воды (в пересчете на сухое вещество), мг/л.

В свою очередь, C определяют, используя зависимость

$$C = M_u + 50 \left(\frac{[\text{CO}_2]}{22} + 2\mathcal{J}_k \right) + 29 \frac{[\text{Mg}^{2+}]}{12} + D_u \left(\frac{100 - m}{100} \right), \quad (2.6)$$

где M_u – содержание взвешенных веществ в исходной воде, мг/л; m – содержание CaO в товарной извести, %.

Известково-содовый метод умягчения воды описывается следующими основными реакциями:



По этому методу остаточная жесткость может быть доведена до 0,5...1, а щелочность с 7 до 0,8...1,2 мг-экв/л.

Дозы извести D_u и соды D_c (в пересчете на Na_2CO_3), мг/л, определяют по формулам

$$D_u = 28 \left(\frac{[\text{CO}_2]}{22} + \mathcal{J}_k - \frac{[\text{Mg}^{2+}]}{12} + \frac{D_k}{e_k} + 0,5 \right), \quad (2.7)$$

$$D_c = 53 \left(\mathcal{J}_{нк} + \frac{D_k}{e_k} + 1 \right), \quad (2.8)$$

где $[\text{Mg}^{2+}]$ – содержание в воде магния, мг/л; $\mathcal{J}_{нк}$ – некарбонатная жесткость воды, мг-экв/л.

При известково-содовом методе умягчения воды образующиеся карбонат кальция и гидроксид магния могут пересыщать растворы и долго оставаться в коллоидно-дисперсном состоянии. Их переход в грубодисперсный шлам длителен, особенно при низких температурах и наличии в воде органических примесей, которые действуют как защитные коллоиды. При большом их количестве жесткость воды при реагентном умягчении воды может снижаться всего на 15...20%. В подобных случаях перед умягчением или в процессе его из воды удаляют органические примеси окислителями и коагулянтами. При известково-содовом методе часто процесс проводят в две стадии. Первоначально из воды удаляют органические примеси и значительную часть карбонатной жесткости, используя соли алюминия или железа с известью, проводя процесс при оптимальных условиях коагуляции. После этого вводят соду и остальную часть извести и доумягчают воду. При удалении органических примесей одновременно с умягчением воды в качестве коагулянтов применяют только соли железа, поскольку при высоком значении рН воды, необходимом для удаления магниевой жесткости, соли алюминия не образуют сорбционно-активного гидроксида. Дозу коагулянта при отсутствии экспериментальных данных рассчитывают по формуле (2.4). Количество взвеси определяют по формуле

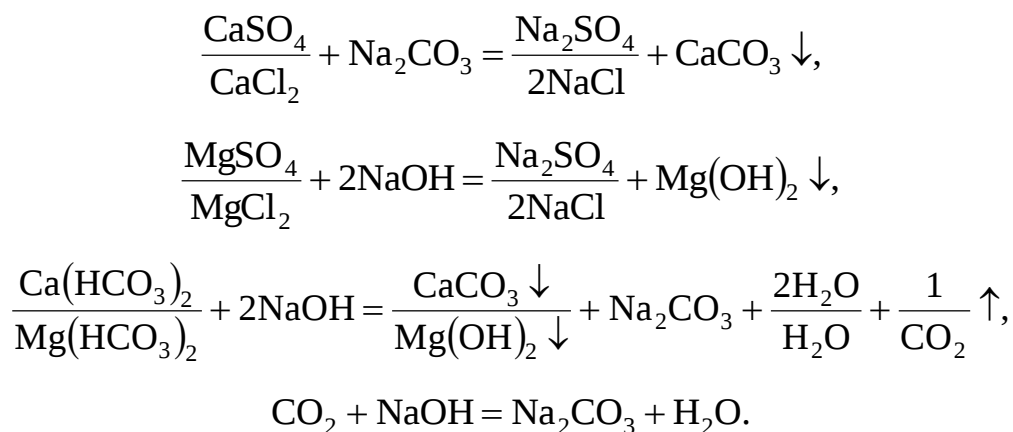
$$C = M_u + 50 \left(\mathcal{J}_o + \mathcal{J}_k + \frac{[\text{CO}_2]}{22} + 0,5 \right) + 29 \frac{[\text{Mg}^{2+}]}{12} + D_u \left(\frac{100 - m}{100} \right), \quad (2.9)$$

где $\mathcal{J}_o$ – общая жесткость воды, мг-экв/л.

Более глубокое умягчение воды может быть достигнуто ее подогревом, добавлением избытка реагента-осадителя и созданием контакта умягчаемой воды с ранее образовавшимися осадками. При подогреве воды уменьшается растворимость CaCO_3 и $\text{Mg}(\text{OH})_2$ и более полно протекают реакции умягчения.

Контроль процесса умягчения воды следует осуществлять коррекцией pH умягченной воды. Когда это невозможно, его контролируют по значению гидратной щелочности, которую при декарбонизации поддерживают в пределах 0,1...0,2 мг-экв/л, а при известково-содовом умягчении – 0,3...0,5 мг-экв/л.

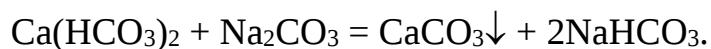
При содово-натриевом методе умягчения воды ее обрабатывают содой и гидроксидом натрия:



Ввиду того, что сода образуется при реакции гидроксида натрия с гидрокарбонатом, необходимая для добавки в воду доза ее значительно уменьшается. При высокой концентрации гидрокарбонатов в воде и низкой некарбонатной жесткости избыток соды может оставаться в умягченной воде. Поэтому этот метод применяют лишь с учетом соотношения между карбонатной и некарбонатной жесткостью.

Содово-натриевый метод обычно применяют для умягчения воды, карбонатная жесткость которой немного больше некарбонатной. Если карбонатная жесткость приблизительно равна некарбонатной, соду можно совсем не добавлять, поскольку необходимое ее количество для умягчения такой воды образуется в результате взаимодействия гидрокарбонатов с едким натром. Доза кальцинированной соды увеличивается по мере повышения некарбонатной жесткости воды.

Содорегенеративный метод, основанный на возобновлении соды в процессе умягчения, применяют при подготовке воды, для питания паровых котлов низкого давления



Гидрокарбонат натрия, попадая в котел с умягченной водой, разлагается под влиянием высокой температуры



Образующаяся при этом сода вместе с избыточной, введенной вначале в водоумягчитель, тут же в котле гидролизует с образованием гидроксида натрия и оксида углерода (IV), который с продувочной водой поступает в водоумягчитель, где используется для удаления из умягчаемой воды гидрокарбонатов кальция и магния. Недостаток этого метода состоит в том, что образование значительного количества CO_2 в процессе умягчения вызывает коррозию металла и повышение сухого остатка в котловой воде.

В технологии реагентного умягчения воды используют аппаратуру для приготовления и дозирования реагентов, смесители, тонкослойные отстойники или осветлители, фильтры и установки для стабилизационной обработки воды. Схема напорной водоумягчительной установки представлена на рис. 2.3. В этой установке отсутствует камера хлопьеобразования, поскольку хлопья осадка карбоната кальция формируются в контактной массе. При необходимости воду перед реакторами осветляют. Оптимальным сооружением для умягчения воды известковым или известково-содовым методами является вихревой реактор (спирактор напорный или открытый) (рис. 2.4). Реактор представляет собой железобетонный или стальной корпус, суженный книзу (угол конусности $15...20^\circ$) и наполненный примерно до половины высоты контактной массой. Скорость движения воды в нижней узкой части вихревого реактора равна $0,8...1$ м/с; скорость восходящего потока в верхней части на уровне водоотводящих устройств – $4...6$ мм/с. В качестве контактной массы применяют песок или мраморную крошку с размером зерен $0,2...0,3$ мм из расчета 10 кг на 1 м³ объема реактора. При винтовом восходящем потоке воды контактная масса

взвешивается, песчинки сталкиваются друг с другом и на их поверхности интенсивно кристаллизуется CaCO_3 ; постепенно песчинки превращаются в шарики правильной формы. Гидравлическое сопротивление контактной массы составляет 0,3 м на 1 м высоты. Когда диаметр шариков увеличивается до 1,5...2 мм, крупную наиболее тяжелую контактную массу выпускают из нижней части реактора и догружают свежую. Вихревые реакторы не задерживают осадка гидроксида магния, поэтому их следует применять совместно с установленными за ними фильтрами только в тех случаях, когда количество образующегося осадка гидроксида магния соответствует грязеемкости фильтров.

При расходах умягчаемой воды до 1000 м³/сут может быть применена водоочистная установка типа «Струя». Обработываемая вода с добавленными к ней реагентами поступает в тонкослойный отстойник, затем на фильтр.

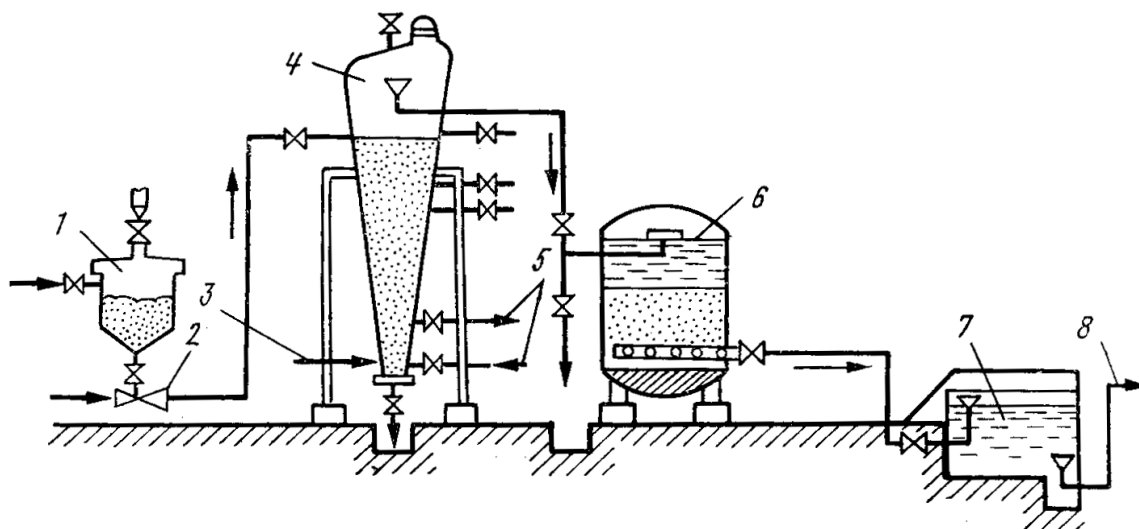


Рис. 2.3. Водоумягчительная установка с вихревым реактором:

- 1 – бункер с контактной массой; 2 – эжектор; 3, 8 – подача исходной и отвод умягченной воды; 4 – вихревой реактор; 5 – ввод реагентов; 6 – скорый осветлительный фильтр; 9 – сброс контактной массы; 7 – резервуар умягченной воды

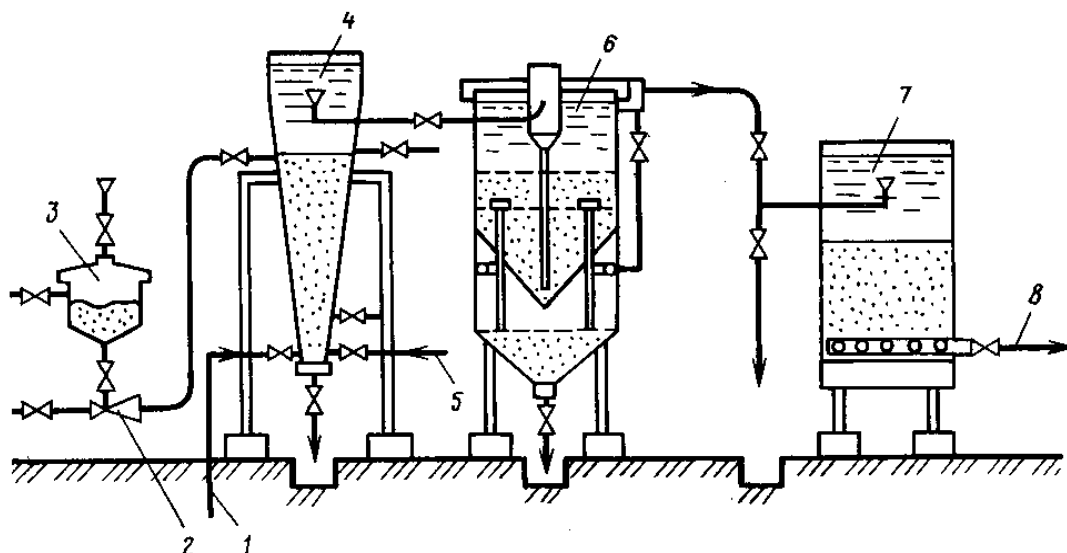


Рис. 2.4. Установка известково-содового умягчения воды:

1, 8 – подача исходной и отвод умягченной воды; 2 – эжектор; 3 – бункер с контактной массой; 5 – ввод реагентов; 6 – осветлитель со слоем взвешенного осадка; 7 – осветлительный скорый фильтр, 4 – вихревой реактор

Термический метод умягчения воды целесообразно применять при использовании карбонатных вод, идущих на питание котлов низкого давления, а также в сочетании с реагентными методами умягчения воды. Он основан на смещении углекислотного равновесия при ее нагревании в сторону образования карбоната кальция, что описывается реакцией

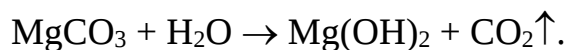


Равновесие смещается за счет понижения растворимости оксида углерода (IV), вызываемого повышением температуры и давления. Кипячением можно полностью удалить оксид углерода (IV) и тем самым значительно снизить карбонатную кальциевую жесткость. Однако, полностью устранить указанную жесткость не удастся, поскольку карбонат кальция хотя и незначительно (13 мг/л при температуре 18°C), но все же растворим в воде.

При наличии в воде гидрокарбоната магния процесс его осаждения происходит следующим образом: вначале образуется сравнительно хорошо растворимый (110 мг/л при температуре 18°C) карбонат магния



который при продолжительном кипячении гидролизует, в результате чего выпадает осадок малорастворимого (8,4 мг/л) гидроксида магния



Следовательно, при кипячении воды жесткость, обусловливаемая гидрокарбонатами кальция и магния, снижается. При кипячении воды снижается также жесткость, определяемая сульфатом кальция, растворимость которого падает до 0,65 г/л.

Термохимическое умягчение применяют исключительно при подготовке воды для паровых котлов, так как в этом случае наиболее рационально используется теплота, затраченная на подогрев воды. Этим методом умягчение воды производят обычно при температуре воды выше 100°C. Более интенсивному умягчению воды при ее подогреве способствует образование тяжелых и крупных хлопьев осадка, быстрее его осаждение вследствие снижения вязкости воды при нагревании, сокращается также расход извести, так как свободный оксид углерода (IV) удаляется при подогреве до введения реагентов. Термохимический метод применяют с добавлением коагулянта и без него, поскольку большая плотность осадка исключает необходимость в его, утяжелении при осаждении. Помимо коагулянта используют известь и соду с добавкой фосфатов и реже гидроксид натрия и соду. Применение гидроксида натрия вместо извести несколько упрощает технологию приготовления и дозирования реагента, однако экономически такая замена не оправдана в связи с его высокой стоимостью.

2.3. Умягчение воды катионированием

2.3.1. Теоретические основы процесса ионного обмена

Ионным обменом называется фильтрование воды через гранулированные иониты (катионы и анионы), представляющие собой полимерные нерастворимые в воде кислоты и основания, способные вступать в реакции ионного обмена с растворенными в воде солями, сорбируя из воды катионы и

анионы и отдавая в раствор эквивалентное количество ионов, которые находятся в матрице ионита.

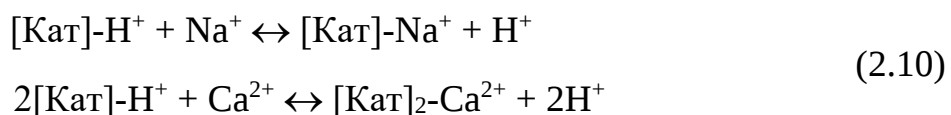
Иониты представляют собой твердые нерастворимые в воде материалы (обычно, полимерные матрицы), являющиеся солями, кислотами или основаниями, и имеющие в своем составе функциональные ионогенные группы, способные к диссоциации в растворах и обмену ионами с электролитами.

В функциональных группах имеются две разновидности ионов: одни ионы жестко закреплены на полимерной матрице (каркасе) ионита, другие – ионы противоположного заряда (противоионы) способные переходить в раствор в обмен на эквивалентное количество других ионов того же знака из раствора.

По свойствам ионогенных групп иониты делятся на катиониты и аниониты.

Катиониты – нерастворимые в воде материалы, представляющие собой соли или кислоты с нерастворимым твердым анионом (катионообменными группами), обменивающиеся в водных растворах катионами.

Реакции ионного обмена на катионитах описываются следующими уравнениями:



Символом [Кат] обозначена нерастворимая матрица катионита, играющая роль аниона кислоты. Условно считают анион катионита одновалентным.

По природе матрицы ионитов подразделяются на неорганические и органические. Органические иониты в свою очередь подразделяются на природные и синтетические. Неорганические иониты в основном являются катионитами. Они могут быть природными и синтетическими.

Ряд природных материалов обладает ионообменными свойствами. Природные неорганические катиониты имеют относительно малую обменную способность и химическую стойкость в растворах кислот и щелочей.

Наибольшую сорбционную способность имеют алюмосиликаты: глины и цеолиты (алюмосиликаты натрия, кальция, магния и др.).

Для повышения обменной способности природных материалов они часто подвергаются дополнительной обработке кислотой, паром, обжигу. Благодаря своей структуре цеолиты и глины обладают свойствами селективности, т.е. селективно, «выборочно» обменивают различные ионы. Полная обменная способность неорганических ионитов существенно ниже, чем у синтетических. Однако их доступность и низкая стоимость дает возможность применять их однократно на водоподготовительных станциях для очистки от радионуклидов и коррекции солевого состава.

Органические иониты – практически все синтетические. Они имеют высокую химическую стойкость, практически не растворимы в воде. По обменной емкости, скорости ионного обмена, химической стойкости и широте применения органические синтетические иониты значительно превосходят неорганические.

Характеристики ионитов

В настоящее время для технологий водоподготовки в нашей стране и за рубежом выпускаются и используются десятки марок ионитов.

Органические иониты различаются:

- по природе ионогенных групп (аниониты и катиониты);
- по силе ионизации ионогенных групп (сильно диссоциирующие и слабодиссоциирующие);
- по материалу матрицы иониты разделяют на полимеризационные (полистирольные, полиакриловые, поливинилпиридиновые) и поликонденсационные (фенол-формальдегидные, полиэтиленполиаминные);
- по типу матрицы иониты разделяются на гелевые, макропористые, волоконные.

Наиболее дешевым органическим синтетическим катионитом является сульфированный гель или сульфоуголь – продукт обработки дробленых частиц угля концентрированной серной кислотой. Сульфоуголь представляет собой

полифункциональный катионит, в его составе содержатся способные к обмену катионов сульфогруппы – SO_3H^- , карбоксильные группы – COOH^- и фенольные гидроксильные группы – OH^- . Поскольку большая часть обменной способности сульфоугля обуславливается обменом на сильнодиссоциированных сульфогруппах, сульфоуголь относится к сильнокислотным катионитам. По сравнению с современными синтетическими катионитами сульфоуголь обладает низкой обменной емкостью и требует больших расходов регенерационных растворов и отмывочной воды.

Катиониты на основе искусственных смол могут изготавливаться путем полимеризации или поликонденсации мономерных соединений, содержащих активные ионогенные группы, или введением активных, способных к ионному обмену групп в готовые полимеры.

Продуктом конденсации фенолсульфокислот с формальдегидом является выпускаемый нашей промышленностью катионит КУ-1. Продуктами сульфирования готовых сополимеров стирола с дивинилбензолом являются отечественный катионит КУ-2 и катионит Amberlite IR-120 (Компания «Rohm and Haas», США).

Важнейшей характеристикой ионита является его полная обменная емкость (ПОЕ), которая соответствует количеству способных к обмену активных функциональных групп ионита в единице его веса или объема.

Полную обменную способность ионита выражают в г-экв поглощаемого ионитом иона на 1 т воздушно-сухого ионита, либо в г-экв поглощенного иона на 1 м³ разбухшего в воде ионита. Она является постоянной величиной, которую указывают в паспорте ионита, и не зависит от концентрации или природы обменивающего иона. Для определения полной обменной способности производят фильтрование раствора поглощаемого иона до тех пор, пока его концентрация в фильтрате не станет равной его концентрации в исходном растворе.

Технологические характеристики катионитов

Катионит, марка	Тип ионогенны х групп	Степень диссоци- ации	Рабочий диапазон рН	Размер зерен в мм	Полная обменная способност ь, Г-экв
Сульфоуголь	- SO_3H^-	Сильно- кислотны й	1 – 14	0,4 – 1,8	570
КУ-1				0,3 – 2	650
КУ-2-8				0,3 – 1,2	1700
КБ-2, КБ-4-10П	- COO^-	Слабо- кислотны й	6 – 14	0,3 – 1	2800
Amberlite IR- 120H	- SO_3H^-	Сильно- кислотны й	1 – 14	0,3 – 1	2000
Amberlite IRC-60	- COO^-	Слабо- кислотны й	6 – 14	0,3 – 1	2800
Dowex MAC-3	- COO^-	Слабо- кислотны й	6 – 14	0,35 – 1,18	1800
Amberlite Amberjet 1200	- SO_3H^-	Сильно- кислотны й	1 – 14	моносфер н. 0,5±0,05	2000
Dowex UPCORE монос-60	- SO_3H^-	Сильно- кислотны й	1 – 14	моносфер н. 0,6±0,05	1800-2000
Dowex marathon C,C-10	- SO_3H^-	Сильно- кислотны й	1 – 14	моносфер н. 0,6±0,05	2000
Purolite Purofine	- SO_3H^-	Сильно-	1 – 14	моносфер	1800

SC,C 650		кислотны й		н. 0,35±0,05	
----------	--	---------------	--	-----------------	--

Количество активных групп катионита или анионита, участвующих в ионном обмене, зависит от условий проведения реакций – температуры и величины pH, поэтому определение полной обменной способности ионита для получения сопоставимых данных проводят в определенных стандартных условиях. Полная обменная способность характеризует потенциальную способность данного ионита к ионному обмену.

Однако в практических условиях работы установок ионного обмена при многократном проведении регенераций обменная емкость используется не полностью, а лишь частично. Поэтому количество ионов, которое может быть поглощено ионитом до полного его насыщения в процессе эксплуатации (с учетом неполноту его использования) называют динамической обменной емкостью (ДОЕ). При работе установок водоподготовки фильтроцикл проводят до тех пор, пока концентрация удаляемого иона в фильтрате не достигнет определенной допустимой величины (называемой проскоком), как правило, значительно меньшей его концентрации в исходной воде. Таким образом, процесс ионного обмена прекращают задолго до полного насыщения ионита. В каждом цикле очистки используется лишь часть полной обменной способности ионита – его рабочая обменная емкость (РОЕ), или полная динамическая обменная емкость.

К числу показателей, характеризующих свойства ионитов, относятся также селективность, гранулометрический состав, коэффициент неоднородности, гидравлические характеристики, механическая прочность, химическая и осмотическая стабильность.

Селективностью называют способность избирательно сорбировать ионы из растворов сложного состава. Селективность определяет сродство различных ионов к иониту и зависит от типа ионогенных групп и степени их диссоциации.

Синтетические иониты полимеризационного типа производятся в виде шарообразных частиц с размерами 0,3-2,0 мм. Средний размер полимеризационных ионитов составляет 0,5-0,7 мм. Коэффициент неоднородности (соотношение количеств крупных и мелких зерен) для полимеризационных ионитов составляет не более 1,9. Благодаря этому обеспечиваются хорошие гидравлические характеристики ионитов – сопротивление слою и расширение при взрыхлении. За рубежом по специальным технологиям выпускают иониты моносферного типа Amberjet, Puroline UPCORE (табл. 2.3), имеющие частицы с очень малым разбросом размеров. Такие иониты имеют более высокую обменную емкость, осмотическую и механическую стабильность. Слои моносферных ионитов имеют меньшее гидравлическое сопротивление, смешанные слои таких ионитов значительно лучше разделяются. Такие иониты используются в новых технологиях противоточной регенерации.

Механическая прочность показывает способность ионита противостоять механическим воздействиям. Иониты проверяются на истираемость в специальных мельницах или по весу груза, разрушающего определенное количество частиц.

Осмотическая стабильность определяется разрушением частиц ионитов при изменении характеристик среды, в которой они находятся. В зависимости от ионной формы ионита, значения pH и солесодержания среды, объем зерна ионита меняется. Вследствие осмотического эффекта объем зерна в концентрированных растворах меньше, чем в разбавленных. Наибольшее изменение объема происходит у слабокислотных катионитов.

При изменении солесодержания или pH раствора, окружающего зерно ионита, внешний слой зерна сжимается или расширяется быстрее, чем ядро. Вследствие возникновения напряжений происходит раскалывание зерна («осмотический ток»). Каждый ионит способен выдерживать определенное число циклов изменений характеристик среды. Осмотическая стабильность определяется как количество целых зерен, отнесенное к общему

первоначальному их числу после многократной (150 раз) обработки навески ионита попеременно в растворе кислоты и щелочи с промежуточной отмывкой обессоленной водой. Наиболее осмотически стабильны сильнокислотные катиониты макропористой структуры, а наименее – слабокислотные катиониты.

Химическая стабильность ионитов определяется стойкостью к растворам кислот, щелочей и окислителей. Среди анионитов преобладают слабоосновные иониты, устойчивые к действию кислот, щелочей и окислителей.

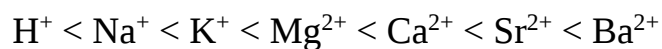
В зависимости от силы ионогенных групп (степени их диссоциации) искусственные катиониты разделяют сильно-, средне- и слабокислотные, которые могут работать в разных условиях. Основные характеристики катионитов показаны в табл. 2.3.

В практике умягчения и обессоливания воды применяются сильнокислотные катиониты, содержащие активные сульфогруппы – SO_3H (катиониты КУ-2-8, сульфоуголь, Амберлайт IR-120, Дауэкс м др.). Реже применяются слабокислотные катиониты, содержащие активные карбоксильные группы COOH (катиониты КБ-4, КБ-4-10П, Амберлайт IRC-50, Дауэкс).

Сильнокислотные сульфокатиониты сорбируют все катиониты металлов из раствора, поэтому их называют универсальными – марка КУ. Сильнокислотные катиониты мало изменяют обменную способность с понижением значения рН среды ниже 7; их обменная способность остается достаточно высокой при величине $\text{pH} \geq 1,5$. Поэтому сильнокислотные катиониты наиболее эффективны при рН растворов от 2 до 14.

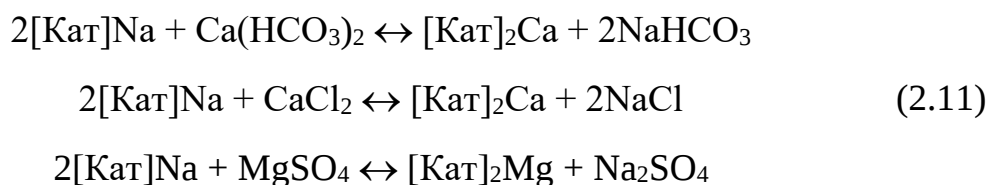
При фильтровании воды через слой зернистого катионита его активные группы вступают в реакцию с катионитами растворенных в воде солей. Селективность, т.е. сродство различных ионов с активными группами, определяется свойствами активных групп. Чем больше сродство, тем лучше сорбируются ионы, причем более сильно-сорбируемые вытесняют слабо-сорбируемые.

Распределение катионитов по энергии сродства (вхождения в катионит) или сорбируемости называют рядом селективности. Ряд селективности для стандартного катионита типа КУ-2-8 выглядит следующим образом:



Каждый последующий член ряда сорбируется сильнее и может вытеснять предыдущий. Для вытеснения из катионита сорбированных катионов (т.е. для их регенерации) в соответствии с рядом селективности используются катионы левой части. Для регенерации используются концентрированные растворы кислот или солей натрия и калия, взятые с большим избытком по сравнению со стехиометрическим количеством.

Катиониты используются в Na-форме или H-форме, в которую они переводятся путем регенерации с помощью растворов поваренной соли или кислоты. При фильтровании воды через слой катионита в Na-форме будут происходить следующие реакции обмена катионов:

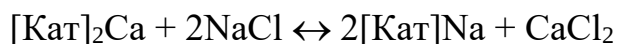


Символом [Кат] обозначена нерастворимая матрица полимера-катионита, условно считаемая одноосновным нерастворимым в воде кислотным остатком.

По мере фильтрования воды через слой катионита в фильтре все большая часть его активных групп будет замещаться кальцием и магнием из воды. Когда все активные группы будут замещены ионами кальция и магния, обменная способность катионита будет полностью исчерпана. В процессе Na-катионирования содержание ионов кальция и магния может быть снижено до величины 0,05-0,1 мг-экв/л, общая щелочность при этом не изменится, сухой остаток несколько возрастает.

Как и всякая химическая реакция, реакция ионного обмена подчиняется закону действия масс. Поэтому регенерация (т.е. обратная реакция замещения ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} на ионы H^+ или Na^+) может быть достигнута увеличением

концентрации продуктов реакции, например, концентрация раствора поваренной соли:



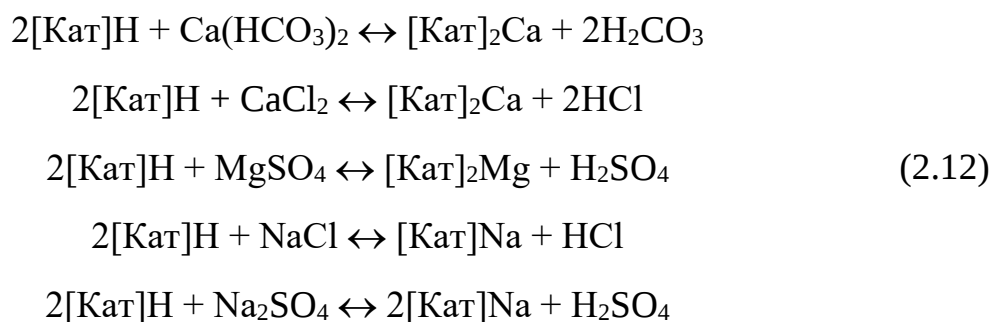
Регенерация проводится до тех пор, пока большая часть активных групп катионита не будет замещена натрием.

При регенерации катионита раствором кислоты активные (способные к обмену) катионы активных групп катионита замещаются Н-ионом кислоты:



и катионит переводится в Н-форму.

Если фильтровать воду через катионит в Н-форме, то все катионы растворенных в воде солей будут поглощаться катионитом, а в воду будет переходить эквивалентное количество Н-ионов. Растворенные в воде соли будут превращаться в соответствующие кислоты по реакциям:

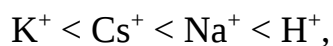


Кислотность воды, прошедшей через Н-катионитовый фильтр, который загружен сильнокислотным катионитом, будет равна сумме концентраций солей сильных кислот.

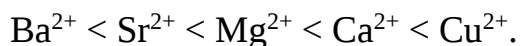
Регенерация Н-катионитовых фильтров кислотой в количестве, недостаточном для полного удаления из катионита катионов жесткости, называется «голодной» регенерацией. При пропускании воды через фильтр, в котором была проведена «голодная» регенерация, из воды удаляются только соли карбонатной (т.е. связанной с бикарбонатами) жесткости, щелочность воды снижается до величины 0,4-0,5 мг-экв/л.

Слабокислотные карбоксильные катиониты обладают высокой селективностью к ионам водорода и многовалентным ионам. Ряд селективности слабокислотных катионитов зависит от величины рН. Для карбоксильного

пористого катионита типа КБ-4-10П и одновалентных ионов ряд селективности имеет вид:



а для двухвалентных ионов:



Ион водорода легко вытесняет все другие катионы из катионита, поэтому слабокислотные катиониты могут работать только в щелочной среде при pH раствора от 7 до 14. При снижении величины pH ниже значения 6 диссоциация активных групп подавляется, и обменная способность катионита резко снижается. Например, обменная способность карбоксильного катионита КБ-4 снижается с величины 4,3 мг-экв/г при pH = 7 до 1,08 мг-экв/г при pH = 5 и 0,15 мг-экв/г при pH=3.

Регенерация может проводиться при движении регенерирующего раствора через слой ионита в том же направлении, что и очищаемый раствор, и в этом случае носит название прямоточной регенерации. Регенерация, проводимая при движении регенерирующего раствора в направлении, противоположном движению очищаемой воды, называется противоточной регенерацией.

Прямоточная (или, как ее еще называют, параллельноточная) регенерация распространена наиболее широко благодаря простоте процесса. Противоточная регенерация обладает рядом преимуществ (более глубокая регенерация загрузки при меньшем расходе реагента), однако требует более сложного аппаратного оформления.

2.3.2. Основные закономерности процесса ионного обмена

Для того чтобы ионы солей, находящиеся в очищаемой воде, могли вступить в реакцию с обменными ионами, находящимися в ионите, должны произойти и завершиться следующие процессы:

- а) диффузия солей через пленку воды на поверхности зерен ионита;
- б) диффузия солей внутрь зерна ионита;
- в) обмен протифундировавших ионов на обменные ионы в ионите;

г) диффузия продуктов обмена из зерен ионита к его поверхности и затем через пленку воды в поток очищаемой воды.

Скорости этих процессов и время, необходимое для их завершения, зависят от концентрации ионов в воде, коэффициентов диффузии этих ионов в пленке воды на поверхности зерен ионита и в самих зернах, скорости диффузии продуктов обмена из зерна ионита. Чем больше концентрация удаляемого (сорбируемого ионитом) иона, тем больше потребуется времени для завершения процесса удаления ионов из движущейся через слой ионита воды, тем большую толщину слоя ионита успеет пройти в фильтре очищаемая вода. На рис. 2.5 показано изменение жесткости умягченной воды при прохождении ее через Na-катионитовый фильтр в зависимости от скорости и расстояния от верхнего уровня слоя катионита. Толщина слоя катионита, при прохождении через которую жесткость воды (или содержание любого извлекаемого иона) снижается от исходного значения до заданного, называется толщиной защитного слоя ионита.

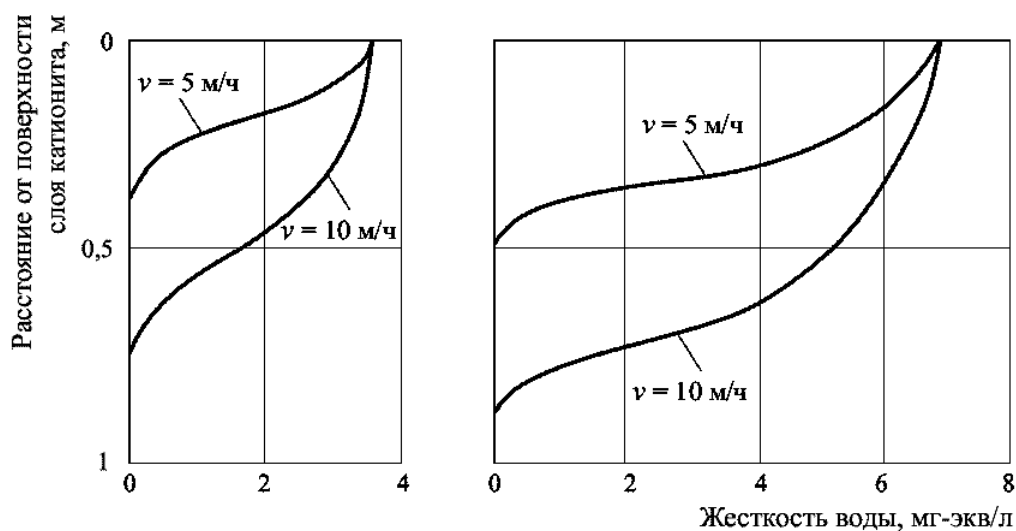


Рис. 2.5. Изменение жесткости умягченной воды при фильтровании ее через Na-катионитовый фильтр.

По мере работы фильтра верхние слои в нем будут насыщаться ионами растворенных в воде солей до наступления равновесного состояния, а

защитный слой будет перемещаться вниз в более глубокие слои ионита. Когда низ защитного слоя переместится до нижней границы слоя ионита, начнется проскок удаляемого иона в фильтрат (для рассматриваемого случая – увеличение жесткости фильтрата).

На рис. 2.6, а показан график зависимости степени использования равновесной обменной емкости катионита в Na-катионитовом фильтре в момент проскока солей жесткости в фильтрат, т.е. в момент, когда начинается постепенное возрастание жесткости фильтрата. Как видно из графика, верхние слои катионита в фильтре в момент проскока солей жесткости в фильтрат насыщены катионами растворенных в воде солей почти до равновесного состояния. Равновесная обменная способность катионита использована почти полностью. В нижнем защитном слое катионита его равновесная способность использована лишь частично, всего на 50-60% (рис. 2.4, б). Процесс очистки воды прекращают при определенном значении проскока жесткости задолго до полного насыщения ионита. Количество поглощенных при этом ионов, соответствующее площади прямоугольника A , отнесенное к объему ионита, составляет динамическую обменную емкость (ДОЕ).

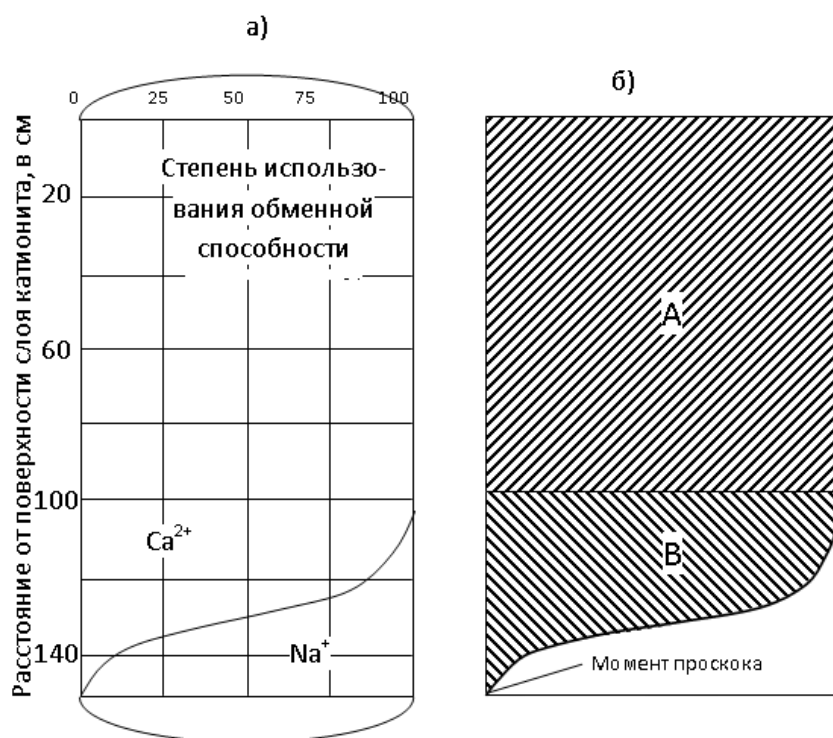


Рис. 2.6. Степень использования обменной способности катионита в фильтре в момент проскока катионов жесткости в фильтрат (а) и определение рабочей обменной емкости (б):

A – зона полного использования равновесной обменной способности; B – защитный слой.

Количество поглощенных ионов, соответствующее полному насыщению и началу проскока, соответствующее сумме ДОЕ и площади фигуры *B* (количеству поглощенных ионов в защитном слое) называют полной динамической емкостью (ПДОЕ).

Так как толщина защитного слоя возрастает с увеличением скорости фильтрования и жесткости умягченной воды, то степень использования емкости поглощения ионита уменьшается с уменьшением общей толщины слоя катионита и увеличением жесткости умягченной воды, а также величины скорости ее фильтрования. При заданной высоте слоя ионита принимаемая скорость фильтрования должна быть тем меньше, чем выше содержание удаляемых ионов в исходной воде.

Изменение концентраций ионов Na^+ и Ca^{2+} в процессе работы Na-катионитового фильтра (выходные кривые сорбции катионов на катионите в Na-форме) показаны на рис. 2.7. По оси абсцисс откладывается число колоночных объемов V_k , которое представляет собой отношение объема пропущенного раствора к объему ионита, а по оси ординат – отношение значений концентраций ионов в выходящем растворе к значениям их исходных концентраций C/C_0 . Раствор после прохождения через катионит остается практически нейтральным.

Функциональные группы катионита определяют степень его диссоциации (кислотность) и сродство к нему различных ионов – селективность (энергию вхождения ионов в катионит). Формирование в слое Na-катионита фронтов сорбции катионов показано на рис. 2.8.

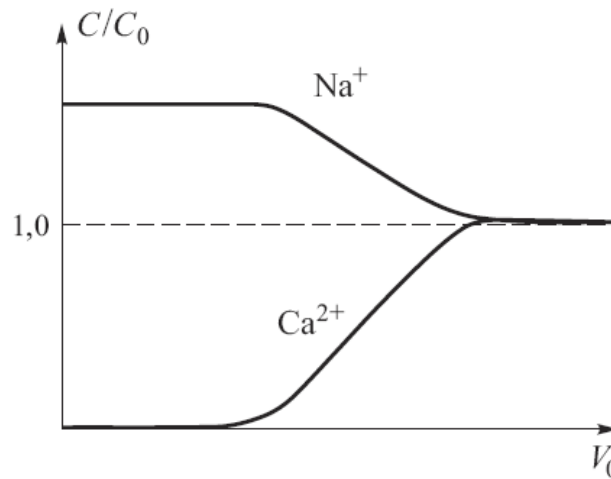


Рис. 2.7. Выходные кривые сорбции катионов Ca^{2+} и Na^{+} на катионите в Na^{+} -форме:
 C/C_0 – отношение текущей концентрации иона к исходной; V_0 – объем профильтрованной воды.

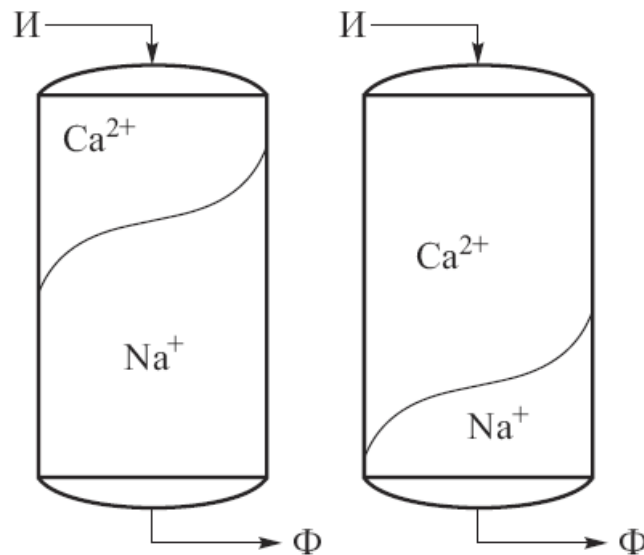


Рис. 2.8. Формирование фронтов сорбции катионов в Na -катионитовом фильтре.

При фильтровании воды через катионит в H -форме воды, содержащей ионы Ca^{2+} , Mg^{2+} и Na^{+} , H^{+} - ионы в верхних слоях катионита замещаются этими катионами.

Из раствора извлекаются катионы, стоящие в ряду селективности правее ионов H^{+} . Так как кальций и магний имеют большее сродство к катиониту, чем натрий (селективность по этим ионам выше), то по мере работы фильтра кальций и магний будут замещать (вытеснять) натрий, ранее поглощенный верхними слоями катионита. Постепенно фронт поглощения натрия, кальция и

магния перемещается вниз. Таким образом, через некоторое время после начала работы Н-катионитового фильтра, в слое катионита образуется пять зон: верхняя зона, катионит в которой равновесно насыщен кальцием и магнием; под верхней зоной находится защитный слой по кальцию и магнию, в котором происходит вытеснение кальцием и магнием натрия; ниже располагается слой, равновесно насыщенный натрием; ниже находится зона замещения Н-иона ионом натрия (защитный слой по натрию), а еще ниже – зона Н-катионита, еще не участвовавшего в процессе ионного обмена. Верхний слой равновесно насыщенного кальцием и магнием катионита будет все время увеличиваться, нижняя граница (фронт сорбции) будет перемещаться вниз, одновременно вниз перемещаются и другие фронты сорбции.

Через некоторое время защитный по натрию слой катионита сместится до нижней границы катионита в фильтре и начнется проскок натрия в фильтрат, при этом кислотность фильтрата Н-катионитового фильтра начнет снижаться (значение рН расти). Когда нижняя граница зоны равновесного насыщения натрием достигнет границы нижнего слоя катионита в фильтре, все Н-ионы из него окажутся вытесненными и кислотность фильтрата станет равной нулю (реакция воды будет нейтральной).

После этого в фильтрате появится щелочность, которая постепенно достигнет величины, равной щелочности исходной воды. Затем до нижней границы опустится фронт сорбции кальция и магния и начнется проскок в фильтрат солей жесткости. Выходные кривые сорбции катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{+} , а также изменения значений рН и щелочности показаны на рис. 2.9. Формирование в слое Н-катионитового фильтра фронтов сорбции катионов показано на рис. 2.10.

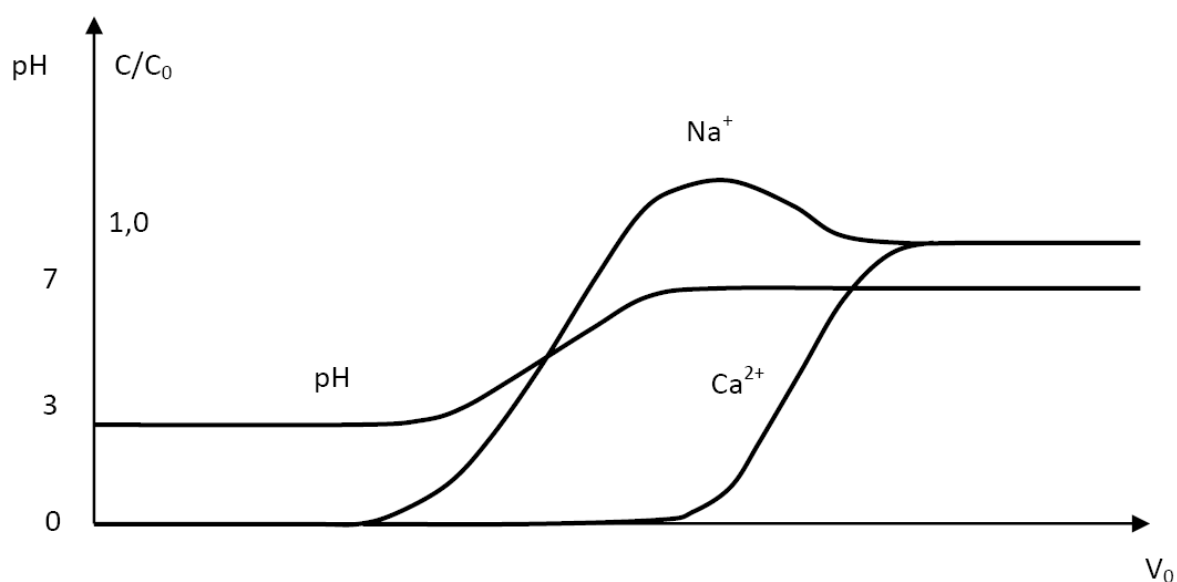


Рис. 2.9. Выходные кривые сорбции катионов на катионите в H^+ -форме.

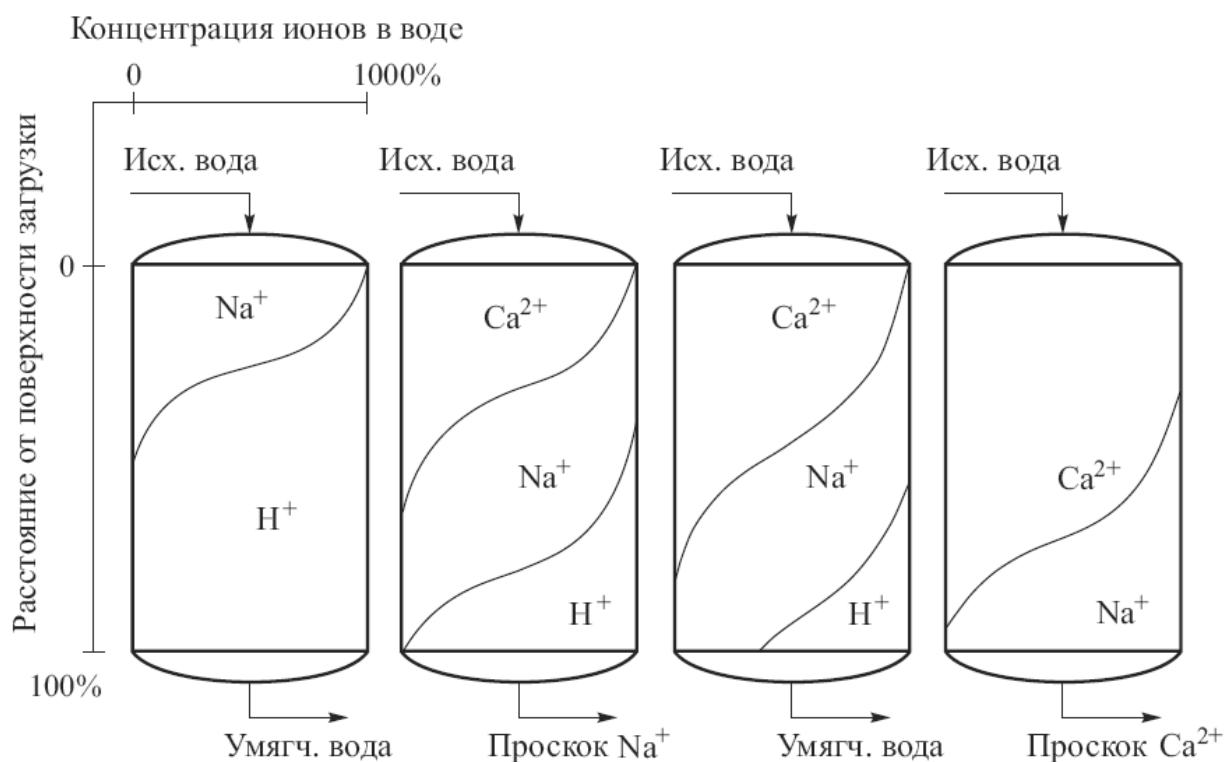


Рис. 2.10. Формирование в катионите в H^+ -форме фронтов сорбции катионов.

Глубина умягчения воды катионированием – это величина остаточной жесткости фильтрата катионитового фильтра. При обработке воды на анионитовых фильтрах важно знать величину остаточного содержания анионов сильных кислот (Cl^- , SO_4^{2-}) в фильтрате слабоосновных анионитов или

концентрацию кремнекислоты на выходе из фильтров с сильноосновным анионитом.

При толщине слоя ионита в фильтре, превышающей толщину защитного слоя при данной скорости фильтрования и концентрации удаляемого иона, верхние слои ионита работают в равновесных условиях (в условиях насыщения удаляемыми ионами).

2.3.3. Регенерация ионитовых фильтров

Целью регенерации ионообменных фильтров является восстановление их обменной способности путем вытеснения поглощенных ионитом ионов и замене их на ионы Na^+ , H^+ (при катионировании) и OH^- (при анионировании) для восстановления обменной способности.

Для регенерации фильтров регенерационный раствор пропускают через слой загрузки ионита в фильтре.

Регенерация может проводиться при движении регенерирующего раствора через слой ионита в том же направлении, что и очищаемый раствор, и в этом случае носит название прямоточной регенерации. Регенерация, проводимая при движении регенерирующего раствора в направлении, противоположном движению очищаемой воды, называется противоточной регенерацией.

Прямоточная (или, как ее еще называют, параллельноточная) регенерация распространена наиболее широко благодаря простоте процесса. Противоточная регенерация, как будет показано ниже, обладает рядом преимуществ, однако требует более сложного аппаратного оформления.

Эффективность регенерации слабо- и сильно диссоциированных ионитов существенно различается. Слабо диссоциированные иониты могут быть отрегенированы практически без избытка кислоты или щелочи. Сильно диссоциированные иониты требуют избытка регенерирующего реагента. Чем выше требуемая степень регенерации и рабочая обменная емкость ионита, тем больше должен быть избыток реагента (рис. 2.11). Распределение фронтов сорбции в слое катионита при регенерации показан на рис. 2.12.

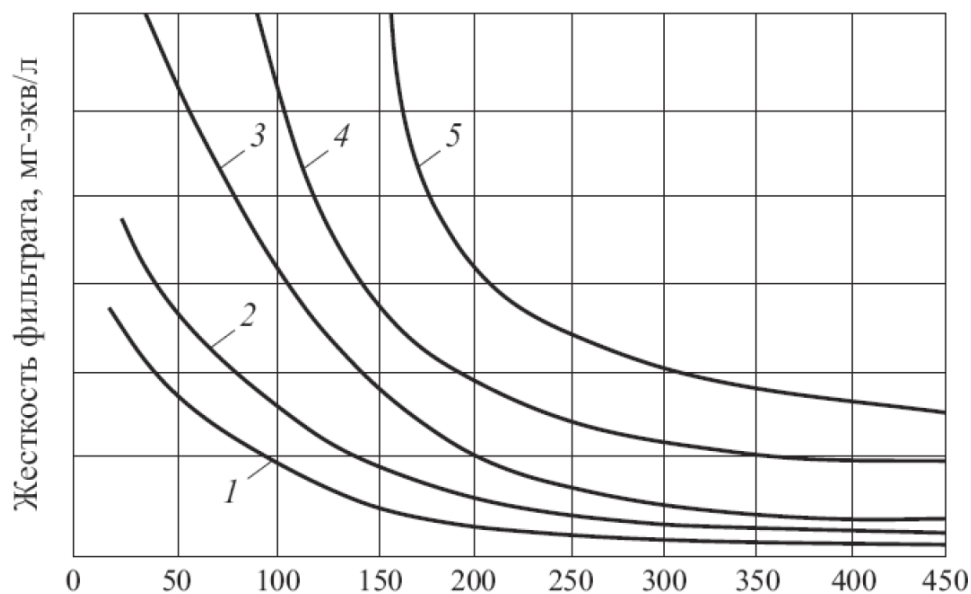


Рис. 2.11. Зависимости жесткости фильтрата Na-катионитовых фильтров от солеcодержания исходной воды и солеcодержания воды: 1 – 1 мг-экв/л; 2 – 2 мг-экв/л; 3 – 3 мг-экв/л; 4 – 4 мг-экв/л; 5 – 5 мг-экв/л.

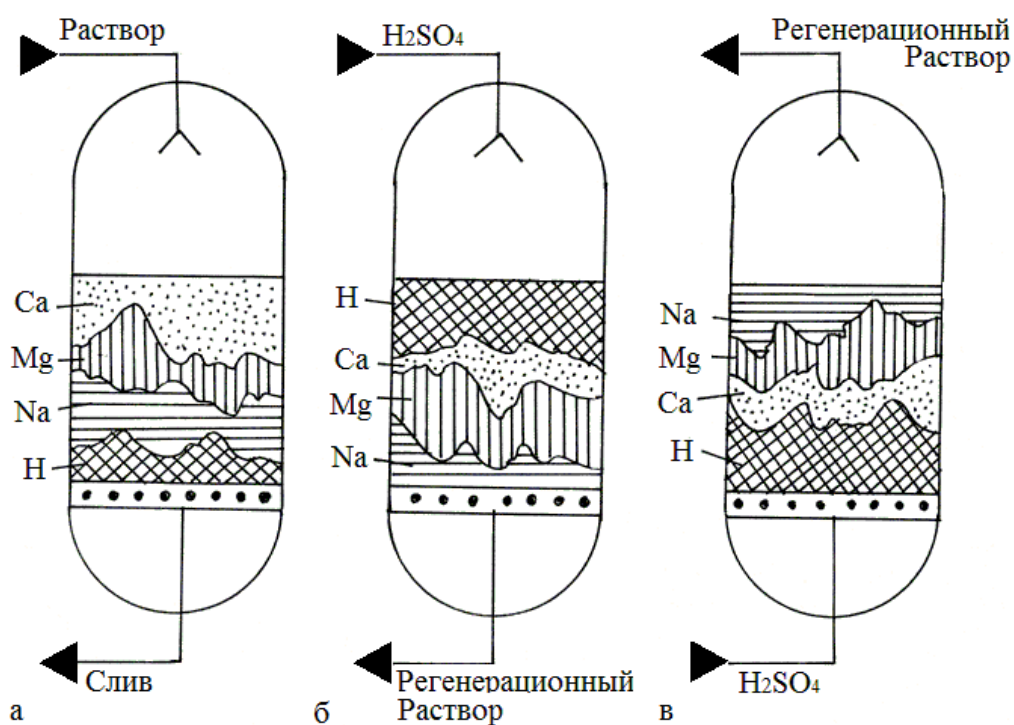


Рис. 2.12. Распределение ионов в слое катионита при сорбции (а), прямоточной (б) и противоточной (в) регенерации.

При фильтровании регенерационного раствора через слой ионита в фильтрате возрастает концентрация вытесненных ионов и снижается

концентрация регенерирующих ионов, что подавляет диссоциацию истощенного анионита и ослабляет процесс ионного обмена. Этот процесс носит название противоионного эффекта, тормозящего регенерацию.

Полнота регенерации ионита характеризуется коэффициентом эффективности регенерации $\alpha_{\text{Э}}$, равным отношению количества замещенных регенерирующим агентом активных групп ионита к его полной обменной способности. Например, для случая Na-катионирования и регенерации катионита раствором поваренной соли коэффициент эффективности регенерации определяется как:

$$\alpha_{\text{Э}} = \frac{E_{\text{Na}}}{E_{\text{полн.}}}, \quad (2.13)$$

Реакция регенерации Na-катионитового фильтра идет в соответствии с реакцией (2.10) в обратном направлении:



Увеличение концентрации натрия в свежем регенерационном растворе обычно приводит к увеличению удельного расхода поваренной соли на регенерацию. Поэтому для повышения эффективности регенерации часто прибегают к увеличению концентрации поваренной соли в конце регенерации. В этом случае регенерацию производят 1,5-2%-ным раствором NaCl и в конце ее подают на фильтр 7-8%-ный раствор соли. При необходимости глубокого умягчения воды используют двухступенчатые схемы Na-катионирования (см. далее), поэтому фильтры I ступени регенерируют 2-3%-ным раствором поваренной соли, а фильтры II ступени – 10%-ным раствором.

Повышение температуры регенерационного раствора до 35-40°C ускоряет диффузионные процессы в ионитах и позволяет повысить эффективность регенерации.

Иониты в фильтре перед проведением процесса регенерации должны взрыхляться для отмывки от задержанной ими взвеси и предотвращения от слеживания. Взрыхление ионита может производиться исходной водой, подаваемой на фильтр или отмывочными водами от предыдущей регенерации

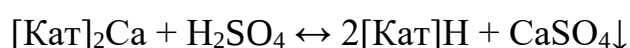
фильтра. Так как отмывочные воды содержат регенерирующее вещество, их применение для взрыхления сопровождается частичной регенерацией ионита, что позволяет повысить степень использования регенерационных реагентов. Взрыхление ведется в течение 15 минут с интенсивностью, обеспечивающей взрыхление всего слоя катионита в фильтре.

Объем бака для сбора отмывочных вод должен быть не менее 5 м³ на 1 м² площади катионитового фильтра, что позволяет собрать и использовать для взрыхления около 50% отмывочных вод. Для отмывки отрегенированных ионитов используется чистая вода после фильтра (умягченная или обессоленная).

Выбор количества поваренной соли для регенерации Na-катионитовых фильтров при одноступенчатом Na-катионировании производят по графикам и таблицам, задаваясь предварительно коэффициентом α , в зависимости от требуемой остаточной жесткости фильтрата.

При двухступенчатом Na-катионировании фильтры I ступени регенерируют 2-3%-ным раствором поваренной соли с удельным расходом 125-150 г NaCl на 1 г-экв рабочей обменной способности катионита, а фильтры II ступени – 10%-ным раствором поваренной соли с удельным расходом 300-400 г NaCl. Большой расход соли применяют при умягчении вод с более высоким солесодержанием.

Регенерацию H-катионитовых фильтров производят растворами серной или соляной кислоты. При применении для регенерации H-катионитовых фильтров серной кислоты концентрация H₂SO₄ в регенерационном растворе не должна превышать 1,4%. При большей концентрации серной кислоты в объеме катионита возникает опасность выпадения кристаллов сульфата кальция (гипса) – загипсовывания загрузки. Это происходит вследствие того, что при вытеснении из катионита кальция концентрации ионов Ca²⁺ и SO₄²⁻ могут превысить значение произведения растворимости по CaSO₄ в соответствии с реакцией:

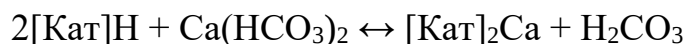
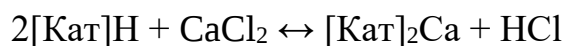


Во избежание выпадения гипса в слое катионита раствор серной кислоты пропускают быстро и без остановок, а фильтр после регенерации немедленно отмывают водой от продуктов регенерации. Процесс образования осадка сульфата кальция характеризуется наличием индукционного (инкубационного) периода – времени, необходимого для начала кристаллообразования (зародышеобразования) из пересыщенного раствора. Обычно продолжительность инкубационного периода для условий регенерации катионита составляет 10-15 минут, поэтому очень важно соблюдать требуемый режим подачи серной кислоты и отмывочной воды при проведении регенерации.

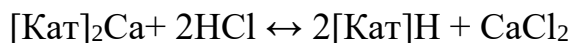
При использовании для регенерации растворов серной кислоты более 1,5% предотвращение выпадения гипса на зернах катионита достигается добавлением в регенерационные растворы ингибиторов кристаллообразования – гексаметафосфата натрия и др. с концентрациями 50-250 г/м³. Избежать загипсовывания загрузки можно полностью при использовании для регенерации соляной кислоты.

Небольшие значения концентрации кислоты в регенерационном растворе (на уровне 1,5%) не всегда обеспечивают достаточно полную регенерацию катионитов, особенно с высокой обменной способностью. При необходимости глубокой регенерации Н-катионитовых фильтров используют соляную кислоту или применяют двухступенчатую регенерацию – сначала фильтр регенерируют 1%-ным раствором H₂SO₄ или NaCl для удаления большей части ионов кальция и магния, а затем подают 5-10%-ный раствор H₂SO₄, не образующий с удаляемым из катионита натрием нерастворимых соединений.

При регенерации Н-катионитовых фильтров кислотой в количестве, недостаточном для полного вытеснения из катионитов катионов Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, катионит в фильтре будет находиться в двух формах: в верхней части – в Н-форме, в нижней – в Са⁻ и Mg-форме. При фильтровании через такой фильтр воды в верхней части фильтра все катионы растворенных солей будут обмениваться на ионы Н⁺:



При этом угольная кислота будет распадаться с образованием H_2O и CO_2 и уходить из сферы реакции. В нижних слоях фильтра будет иметь место реакция обмена между Са-Mg-катионитом и кислотой:



В результате этого вся карбонатная жесткость (т.е. эквивалентная содержанию ионов HCO_3^-) будет удаляться из воды, а некарбонатные – оставаться в воде.

Технология регенерации Н-катионитовых фильтров кислотой в количестве, недостаточном для полного удаления из катионита катионов жесткости, называется «голодной» регенерацией. Фильтр, работающий в режиме «голодной» регенерации, удаляет из воды только соли карбонатной жесткости, снижая щелочность воды до значения 0,4-0,5 мг-экв/л, но не снижая некарбонатной жесткости воды.

При подаче регенерирующего раствора в фильтр снизу вверх нижние слои оказываются более глубоко отрегенированными. Поэтому очищаемая вода, контактируя с ионитом в нижнем слое, очищается более глубоко. Применение противоточной регенерации позволяет более эффективно использовать обменную емкость, снизить расходы реагентов и добиться более чем высокой эффективности.

При проведении прямоточной (параллельноточной) регенерации для достаточно полного вытеснения ионов из слоя ионита требуется большой (обычно 2-х-3-х кратный) избыток регенерирующего реагента. При этом расход реагента тем выше, выше солесодержание и жесткость исходной воды, и чем больше требуется глубина удаления катионов и анионов. Технология противоточной регенерации позволяет сократить расход реагентов на регенерацию и обеспечить более глубокое удаление из воды ионов солей. Технологию противоточной регенерации применяют также при обработке воды с высокой минерализацией.

Основные недостатки процесса прямоточной регенерации связаны со следующими «явлениями»:

1. В процессе работы ионообменного фильтра слои загрузки оказываются неравномерно «загрязнены» ионами солей. Фильтры отключаются по проскоку ионов. При взрыхлении ионитов происходит перемешивание различных слоев загрузки, и наиболее загрязненные зерна загрузки оказываются «размазанными» по слоям. После проведения регенерации плохо отрегенированные зерна ионита оказываются в нижней части слоя, ухудшая качество обессоленной воды. Для устранения этого требуются большие расходы регенерирующего раствора и отмывочной воды.

2. В процессе взрыхления происходит «стратификация» загрузки фильтра, при этом зерна малого размера и меньшей плотности оказываются в верхней части фильтра. Это ведет к увеличению гидравлического сопротивления фильтра, быстрому приросту перепада давлений в процессе эксплуатации при загрязнении верхнего слоя и, следовательно, к снижению расхода.

Таким образом, причиной неэффективного проведения регенерации является перемешивание слоев фильтра. Для проведения эффективной регенерации необходимо избежать перемешивания, т.е. «зажать» слой. Поэтому после пропуска регенерационного раствора «снизу вверх» нижние слои фильтра оказываются «идеально» чистыми. Очищаемая вода на выходе из фильтра контактирует с наиболее регенированными зернами ионита, что обеспечивает глубокую степень обессоливания. Схема распределения ионов в слое катионита при прямоточной и противоточной регенерации показана на рис. 2.12.

Для осуществления процесса противоточной регенерации необходимо иметь соответственно подготовленную для «зажатия слоя» конструкцию фильтра и специальные «монодисперсные» иониты («моносферы») с зернами одинакового размера и плотности.

2.3.4. Схемы установок ионообменного умягчения воды

Технология применения катионитов (тип катионита, технология регенерации, типы применяемых реагентов) зависят от требований к качеству получаемой воды. Разные технологии позволяют снизить жесткость, щелочность до требуемого значения.

Na-катионирование позволяет удалить из воды ионы Ca^{2+} и Mg^{2+} , замещая их на ионы Na^+ . Солесодержание воды при этом практически не меняется, поскольку катионы Ca^{2+} , имеющие эквивалентный вес равный 20, заменяются на катионы Na^+ с эквивалентным весом равным 23. Поскольку при Na-катионировании анионный состав воды не меняется, раствор остается практически нейтральным. Величина щелочности воды и pH могут увеличиваться на 0,1-0,2 в зависимости от содержания солей жесткости. С помощью Na-катионирования на одной ступени при проведении прямоточной регенерации не удастся получить значение жесткости ниже 0,05 мг-экв/л (обычно 0,1 мг-экв/л).

Технологическая схема применения Na-катионирования в одну ступень с использованием сильнокислотного катионита показана на рис. 2.13а и в табл. 2.4, п.1. Такие схемы широко применяются в различных видах промышленности (например, пищевой), а также в энергетике для подпитки теплосетей или подготовки воды для водогрейных котлов.

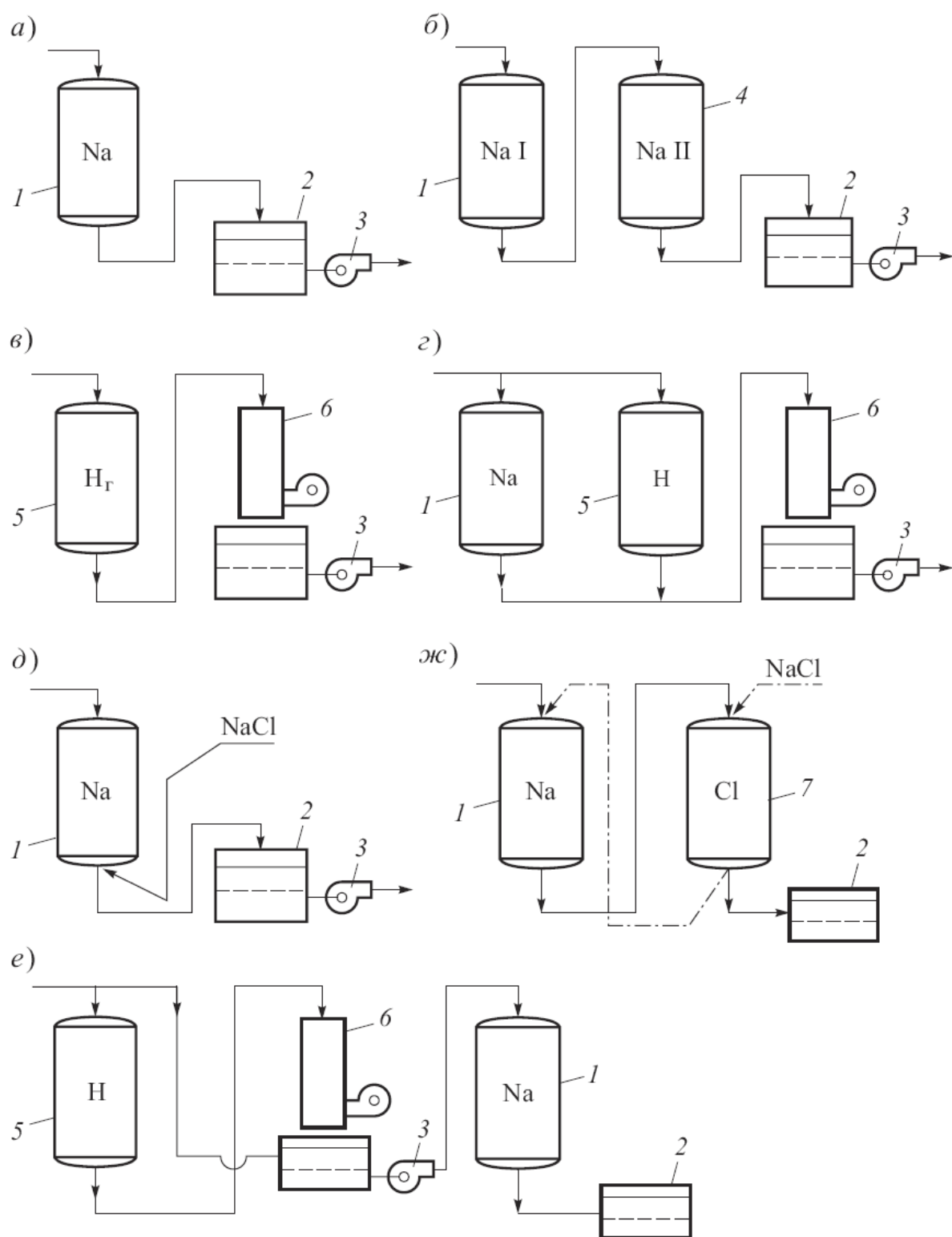


Рис. 2.13. Технологические схемы умягчения воды:

а) одноступенчатое натрий-катионирование; б) двухступенчатое натрий-катионирование; в) H-катионирование с «голодной» регенерацией; г) параллельное H-Na катионирование; д) Na-катионирование с противоточной регенерацией; е) последовательное H-Na катионирование; ж) последовательное Na-Cl ионирование; 1 – Na-катионитовый фильтр; 2 – бак умягченной воды; 3 – насос; 4 – Na-катионитовый фильтр II ступени; 5 – H-катионитовый фильтр; 6 – дегазатор; 7 – Cl-анионитовый фильтр

Таблица 2.4

Основные схемы умягчения и глубокого умягчения воды и технологии регенерации

№ п/п	Название процесса, схема	Качество очищенной воды	Рабочая обменная емкость, мг-экв/л	Тип катионита, тип регенерации
1	Одноступенчатое Na- катионирование	$Ж \geq 0,05$ Щ – не изм.	500 – 700	Сильнокислотный , прямоточная
2	Двухступенчатое Na- катионирование	$Ж \geq 0,01$ Щ – не изм.	500 – 700	Сильнокислотный , прямоточная
3	Одноступенчатое Na- катионирование с противоточной регенерацией	$Ж \geq 0,01$ Щ – не изм.		Сильнокислотный , противоточная
4	Одноступенчатое H- катионирование с нейтрализацией	$Ж \geq 0,01$ Щ $\leq 0,1$	500	Сильнокислотный , прямоточная
5	H-катионирование с «голодной» регенерацией	$Ж \geq 0,01$ Щ $\leq 0,1$	500	Сильнокислотный , прямоточная
6	Одноступенчатое H- катионирование на слабокислотном катионите с «голодной» регенерацией	$Ж \geq 0,01$ Щ $\leq 0,1$	2000	Сильнокислотный , противоточная
7	Параллельное H- Na- катионирование	$Ж \geq 0,05$ Щ $\geq 0,35$	500 – 700	Сильнокислотный , прямоточная
8	Последовательное H- Na- катионирование	$Ж \geq 0,05$ Щ $\geq 0,7-1,0$	500 – 700	Сильнокислотный , противоточная
9	Последовательное Na-Cl-	$Ж \geq 0,01$		Сильнокислотный

	ионирование	$\text{Щ} \geq 0,3-0,5$		, сильноосновной анионит
--	-------------	-------------------------	--	-----------------------------

Для подготовки питательной воды паровых котлов требуется жесткость на уровне 0,01 мг-экв/л и ниже. Для получения такой воды используют двухступенчатое Na-катионирование, когда исходная воды последовательно проходит через 2 фильтра с катионитом. Поскольку на вторую ступень поступает значительно меньше солей жесткости, чем на первую (в 30-100 раз), скорость в ней может быть намного выше, чем в первой. Емкость катионита в фильтрах второй ступени составляет 500-700 мг-экв/л загрузки, и его регенерация проводится в 10-20 раз реже, чем катионита первой ступени. Однако для обеспечения глубокого умягчения и глубокой регенерации на 2-ой ступени расход соли требуется существенно выше, чем на первой. При двухступенчатом Na-катионировании фильтры первой ступени можно отключать на регенерацию не в начале проскока солей жесткости, а при их полном проскоке. Это позволяет более полно использовать обменную емкость катионита и экономить реагенты для регенерации. Схема двухступенчатого Na-катионирования с сильноокислотным катионитом и прямоточной регенерацией показана на рис. 2.13б (табл. 2.4, п. 2).

При использовании противоточной регенерации одноступенчатой системы Na-катионирования можно добиться такой же глубины умягчения, как и при двухступенчатой. Глубоко отрегенированные нижние слои играют роль второй ступени умягчения и, таким образом, позволяют более полно использовать обменную емкость фильтра. Применение противоточной регенерации по сравнению с прямоточной позволяет при том же расходе соли добиться более глубокого умягчения или обеспечить значительную (на 30-50%) экономию соли при тех же параметрах очищенной воды, значительно увеличив фильтроцикл. Схема Na-катионирования с противоточной регенерацией показана на рис. 2.13д (табл. 2.4, п. 3).

В случаях, когда из воды необходимо удалить не только ионы жесткости, но также снизить щелочность и частично величину общего солесодержания, используют процессы Н-катионирования, а также последовательного или параллельного Н-Na-катионирования с использованием сильнокислотных или слабокислотных анионитов. Эти технологии позволяют удалить из воды щелочность, однако недостатком этих технологий является использование кислоты и потребность в специальном кислотостойком оборудовании, а также оборудовании для удаления образующейся углекислоты.

Технология Н-катионирования позволяет полностью удалить жесткость и щелочность, а также частично снизить солесодержание. При прохождении через Н-катионит все катионы заменяются ионами водорода, значение рН раствора становится равным 2,5-4,0 в зависимости от исходного солесодержания. Все бикарбонат-ионы полностью переходят в углекислый газ, который может быть удален в декарбонизаторе. Вода после декарбонизатора содержит только анионы сильных солей и имеет щелочную реакцию. Для ее нейтрализации в воду дозируют раствор щелочи. В результате очищенная вода содержит минимальное значение щелочности ($\text{Щ} \leq 0,1$), содержание катионов соответствует сумме анионов сильных кислот, а величина общего солесодержания становится меньше на величину исходной щелочности.

Схема Н-катионирования показана на рис. 2.13в, г, е (табл. 2.4, п. 4).

Технология Н-катионирования с «голодной» регенерацией, т.е. регенерация без избытка кислоты, позволяет одновременно снизить значение жесткости и щелочности воды.

Как было показано выше, при таких условиях катионит удаляет только карбонатную жесткость, т.е. остаточная жесткость очищенной воды равна разнице значений жесткости и щелочности в исходной воде. Остаточная щелочность близка к 0. Рабочая емкость слабокислотных катионов составляет около 2000 мг-экв/л, что значительно выше, чем при «голодной» регенерации сильнокислотного катионита.

Схема Н-катионирования с «голодной» регенерацией показана на рис. 2.13в (табл. 2.4, п. 5).

Для получения глубокоумягченной воды с одновременным снижением щелочности можно использовать фильтрование в одну ступень через Н-катионитовый фильтр со слабокислотным катионитом. Слабокислотный катионит регенерируется в противоточном режиме в две стадии. Сначала катионит регенерируется кислотой, а затем нижние слои регенерируют раствором щелочи NaOH, благодаря чему нижние слои переходят в Na-форму. Таким образом, в фильтре последовательно осуществляется Н-катионирование (умягчение и снижение щелочности) с последующим Na-катионированием (глубоким умягчением).

Схема процесса Н-катионирования на слабокислотном анионите с «голодной» регенерацией показана на рис. 2.13в (табл. 2.4, п. 6).

При проведении процесса Н-катионирования с «голодной» регенерацией все параметры состава воды за исключением жесткости (щелочность, pH, общее солесодержание) постоянно меняются.

При необходимости поддерживать щелочность на заданном уровне при минимальном значении жесткости применяют параллельное Н-Na-катионирование или последовательное Н-Na-катионирование. При параллельном Н-Na-катионировании часть исходной воды проходит Н-катионирование на сильнокислотном катионите, а другая часть проходит умягчение на Na-катионитовых фильтрах также с сильнокислотным катионитом. Из воды, прошедшей Н-катионирование, удаляются все катионы, замещаясь на катионы водорода. Значение pH раствора становится равным 2,5-4,0 в зависимости от солесодержания. Бикарбонат-ионы разрушаются и переходят в уголекислоту. В воде, прошедшей через катионит в Na-форме, катионы солей жесткости заменены на натрий, pH не меняется. Потоки после Н- и Na-катионитовых фильтров смешиваются в заданных соотношениях и подаются на декарбонизатор, где удаляется растворенная уголекислота.

Отношение потоков после Н-катионирования Q_{H^+} к общему потоку обрабатываемой воды $Q_{исх.}$ может быть найдено из соотношения:

$$Q_{И} \cdot Щ_{ост.} = Q_{H} \cdot Щ_{H} + Q_{Na} \cdot Щ_{И}.$$

Откуда получим:

$$\frac{Q_H}{Q_{И}} = \frac{Щ_{И} - Щ_{ост.}}{Щ_{И} - Щ_H}, \quad (2.14)$$

где Q_H – поток после Н-катионитового фильтра; $Q_{И}$ – поток исходной воды; $Щ_{И}$ – исходная щелочность воды; $Щ_H$ – щелочность после Н-катионитового фильтра; $Щ_{ост.}$ – щелочность после смешения фильтратов Н-катионитового и Na-катионитового фильтров.

Задаваясь значением остаточной щелочности $Щ_{ост.}$, определяют значение Q_H .

Параллельное Н-Na-катионирование используется тогда, когда остаточная щелочность не превышает 0,35 мг-экв/л, в исходной воде карбонатная жесткость составляет более 50%, а сумма концентраций солей кислых кислот – менее 5-7 мг-экв/л. Схема параллельного Н-Na-катионирования приведена на рис. 2.13г (табл. 2.4, п. 7).

Последовательное Н-Na-катионирование заключается в пропускании части исходной воды через катионит в Н-форме, смешении подкисленного раствора с исходной водой, удаления углекислоты в декарбонизаторе и последующем умягчении всего потока на Na-катионитовом фильтре. Обычно используется «голодная» регенерация Н-катионитовых фильтров, и в воде после Н-катионирования остается некарбонатная жесткость. Величина щелочности перед Na-катионированием поддерживается на уровне 0,7-1,0 мг-экв/л.

Последовательное Н-Na-катионирование используется для вод с повышенной минерализацией (более 1000 мг/л), когда величина карбонатной жесткости составляет менее 50% от общей. Схема процесса представлена на рис. 2.13е (табл. 2.4, п. 8).

2.3.5. Оборудование ионообменных установок. Реагентное хозяйство ионообменных установок

В отечественной промышленности применяются ионообменные аппараты (фильтры) периодического действия. Аппараты периодического действия отличаются тем, что все технологические процессы (ионный обмен, взрыхление, регенерация, отмывка) проводятся в одном аппарате. В зависимости от направления движения очищаемого раствора фильтры могут быть прямоточными (параллельноточными) и противоточными.

Управление работой фильтров осуществляется открытием и закрытием задвижек для подачи воды или регенерационного раствора. Чаще всего используются задвижки с электроприводом. Часто используются запорные клапана с пневматическим или гидравлическим приводом. Импортные системы ионного обмена небольших производительностей используют для управления ионообменными фильтрами многоканальные клапаны. Кроме ионообменных фильтров станции водоподготовки используют оборудование для приготовления регенерационных растворов, баки, насосы и др.

Катионитовые и анионитовые фильтры прямоточного типа серийно выпускаются на Бийском котельном заводе (БиКЗ) диаметром 1,0 и 1,5 м и на Таганрогском заводе «Красный котельщик» (ТКЗ) диаметром 2,0; 2,6; 3,0 и 3,4 м. Фильтры состоят из корпуса верхнего распределительного устройства и дренажной системы для отвода из фильтра очищенной воды и подачи в него воды для взрыхления ионита (нижнего дренажного устройства) (рис. 2.14).

Верхнее распределительное устройство служит для распределения по площади фильтра исходной воды, подачи в фильтр регенерационного раствора и отвода из фильтра воды при взрыхлении.

Нижнее дренажное устройство представляет из себя коллектор с дренажными колпачками. Внутри корпуса находится слой ионита. Он не должен превышать по высоте 0,5-0,7 высоты фильтра, чтобы избежать потерь (уноса) ионита при его расширении во время взрыхления.

На подводящих и отводящих трубопроводах устанавливается запорная арматура с ручным, гидро-, пневмо- или электроприводом. Схема обвязки прямоточного фильтра показана на рис. 2.15.

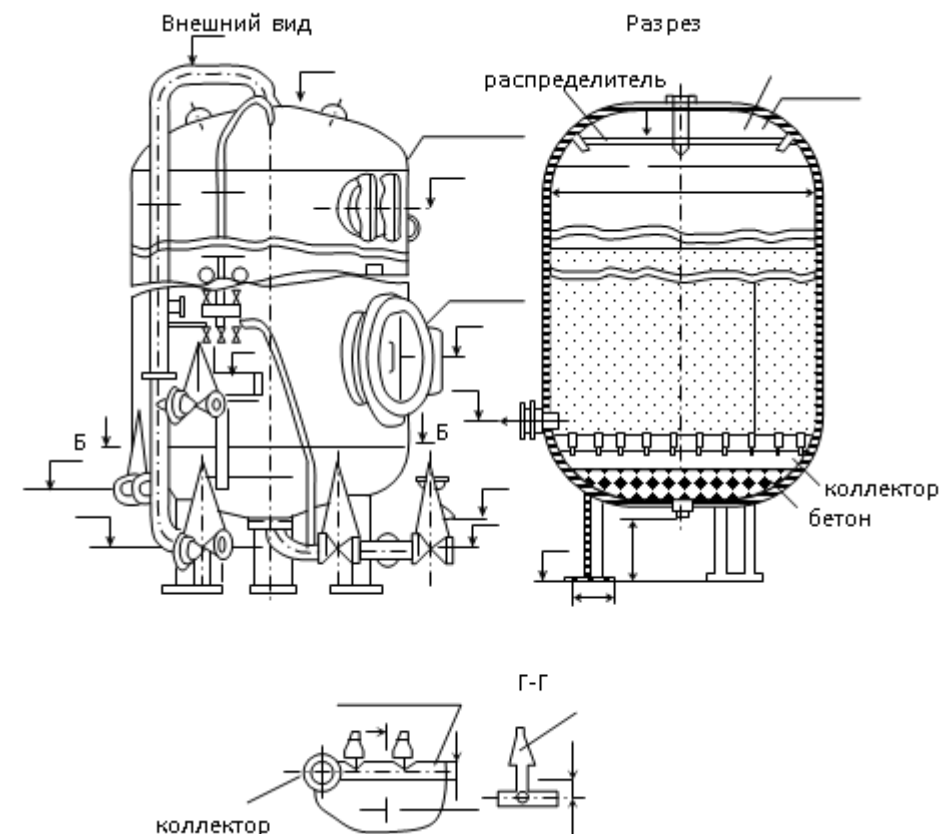


Рис. 2.14. Стандартный параллельноточный натрий-катионитный фильтр первой ступени ФИПа1-1.5-0.6: а) внешний вид; б) разрез; в) нижнее колпачковое устройство;
1 – корпус; 2- ионит; 3 – коллектор; 4 – бетон; 5 – колпачок; 6 - распределитель

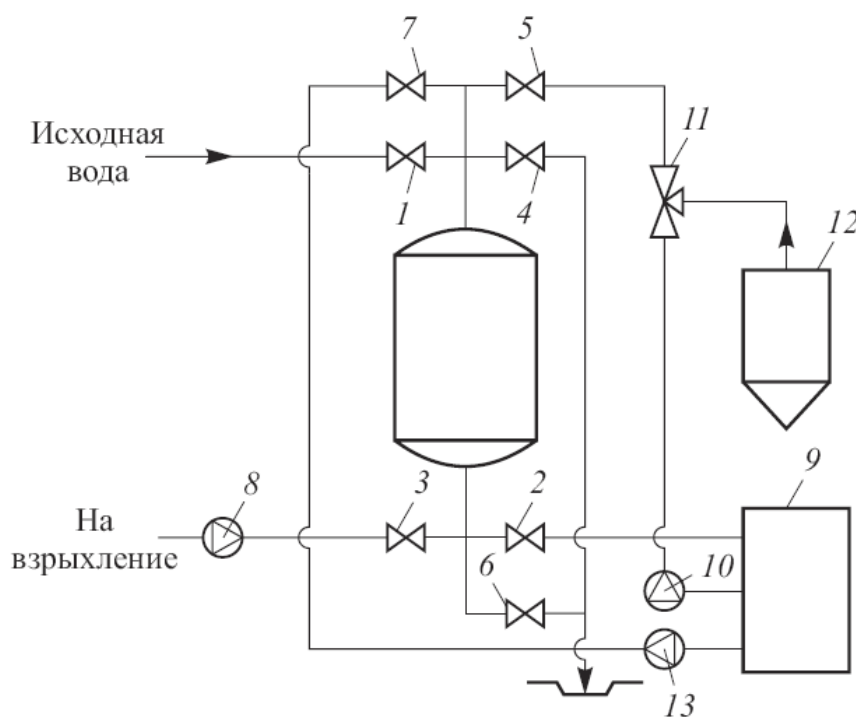


Рис. 2.15. Принципиальная схема обвязки ионитного фильтра:

1 – подача исходной воды, 2 – выход очищенной воды, 3 – подача воды на взрыхление ионита, 4 – сброс воды после взрыхления, 5 – подача регенерационного раствора, 6 – сброс отработанного регенерационного раствора, 7 – подача воды для отмывки ионита, 8 – насос подачи воды на взрыхление ионита, 9 – бак очищенной воды; 10 – насос подачи воды для приготовления регенерационного раствора; 11 – эжектор; 12 – бак с крепким регенерационным раствором; 13 – насос подачи воды на отмывку ионита

Противоточные фильтры несколько сложнее прямоточных, но они позволяют достичь более высокого эффекта очистки и сократить объемы потребляемых реагентов и сбрасываемых стоков. Основной задачей при создании таких фильтров является необходимость обеспечить отсутствие перемешивания во время процессов сорбции и регенерации.

Конструкция фильтров «с зажатым слоем», серийно выпускаемых Таганрогским заводом «Красный котельщик», показана на рис. 2.16. Такой фильтр состоит из корпуса, верхнего распределительного, среднего сборно-распределительного и нижнего дренажного устройств. Внутри корпуса находится слой ионита, он превышает на 0,15-0,20 м высоту среднего распределительного устройства. Для улучшения качества очистки в зарубежных фильтрах верхняя часть слоя под и над средним дренажом

выполняется из инертного материала. Гранулы внутри инертного материала имеют больший диаметр, чем гранулы ионита, благодаря чему большая часть взвеси задерживается инертным слоем, и улучшаются условия работы средней дренажной системы.

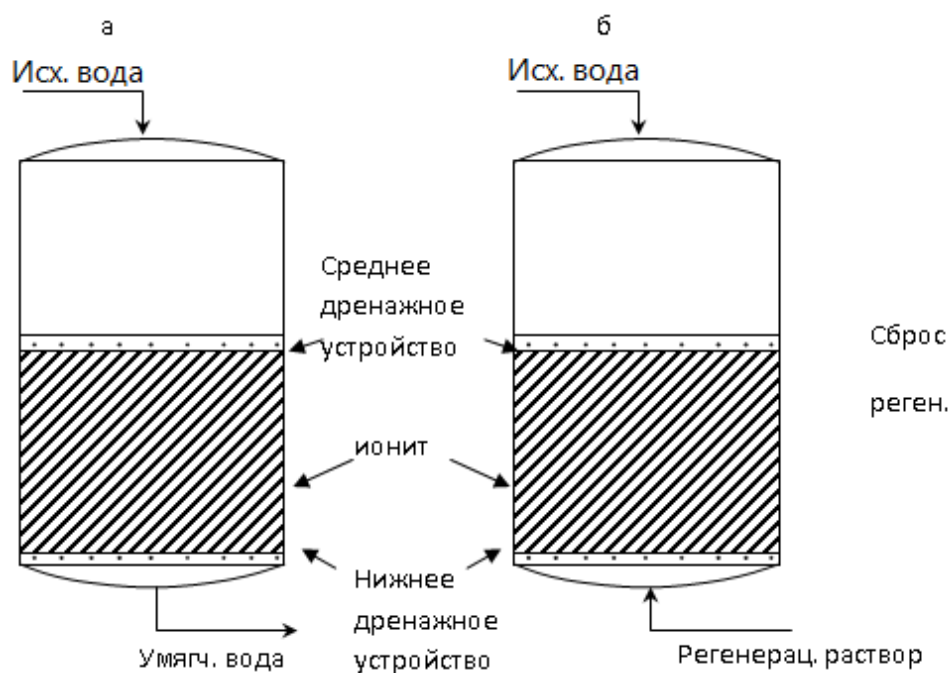


Рис. 2.16. Устройство противоточного фильтра со средним дренажным устройством:
а – режим работы; б – режим регенерации

Мокрое хранение соли для удобства эксплуатации осуществляют не менее чем в двух железобетонных резервуарах (рис. 2.17). Схема кислотного хозяйства показана на рис. 2.18.

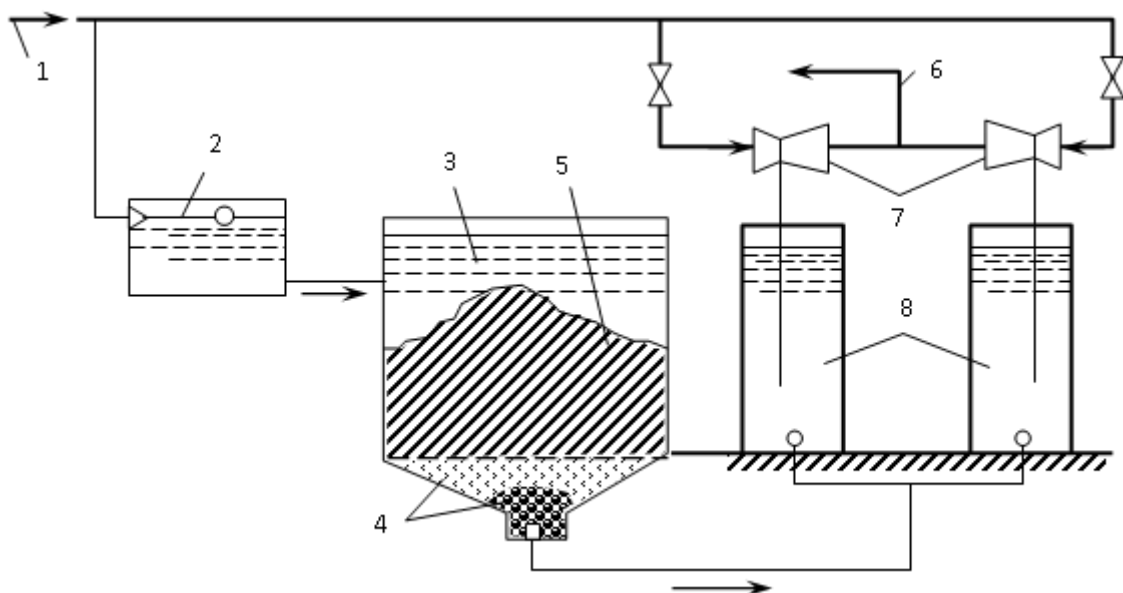


Рис. 2.17. Схема солевого хозяйства:

1 – подача воды; 2 – бак постоянного уровня; 3 – резервуар-хранилище поваренной соли; 4 – гравийно-песчаный осветлительный фильтр; 5 – слой соли; 6 – отвод раствора соли на регенерацию; 7 – эжектор; 8 – расходные баки соли.

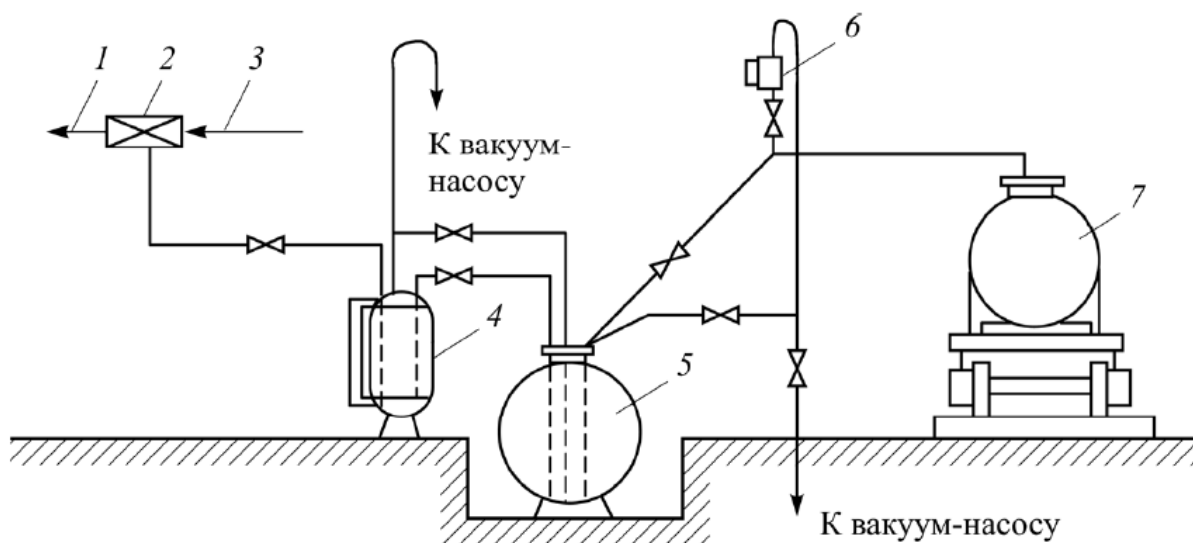


Рис. 2.18. Схема кислотного хозяйства:

1 – отвод 1% регенерационного раствора кислоты; 2 – эжектор; 3 – подача воды; 4 – мерный бак; 5, 7 – стационарная и железнодорожная цистерна; 6 – промежуточный бачок

2.4. Обессоливание воды

2.4.1. Классификация методов обессоливания воды

Обессоливанием называют снижение солесодержания воды до концентраций, близких к значениям содержания солей в дистиллированной воде и ниже. Существующие методы обессоливания воды подразделяют на две основные группы: с изменением и без изменения агрегатного состояния воды. К первой группе методов относят дистилляцию, нагрев воды до сверхкритической температуры (350 °С), замораживание, газогидратный метод; ко второй – ионный обмен, обратный осмос, электродиализ, электродеионизация, прямой осмос и др. Наиболее распространены в практике дистилляция, ионный обмен, обратный осмос и электродеионизация.

Выбор метода обуславливается качеством исходной и требованиями к качеству обработанной воды, производительностью установки и технико-экономическими соображениями. Стоимость обессоливания воды ионным обменом сильно возрастает с увеличением содержания соли в воде; одновременно снижается глубина обессоливания воды. Поэтому обессоливание ионным обменом предпочтительно для вод со степенью минерализации менее 0,8-1,0 г/л. Выбор метода обессоливания для воды со степенью минерализации более 1,0 г/л должен производиться экономическим сравнением обратного осмоса, дистилляции, электродиализа или других методов с учетом местных условий.

Дистилляция требует высоких эксплуатационных затрат. В настоящее время используется много крупных дистилляционных установок для водоснабжения городов, использующих избыточное низкопотенциальное тепло АЭС или дешевые тепловые ресурсы (нефть). Для опреснения подземных вод долгое время считается эффективным процесс электродиализа. Эксплуатационные затраты (электроэнергии) пропорциональны перенесенной через мембрану соли, поэтому процесс электродиализа оптимален при солесодержании воды от 1,5 до 6 г/л.

Для большинства случаев опреснения наиболее эффективным и экономически целесообразным признан процесс обратного осмоса – как для подземных вод с малой минерализацией, так и морских вод. Производительность современных установок составляет от 0,1 до 100000 м³/ч. В ряде случаев для опреснения используют метод ионного обмена. Однако вследствие высоких затрат на регенерацию использование его ограничивается получением малых объемов воды (например, в чрезвычайных ситуациях). Основные технологии и методы опреснения воды показаны в табл. 2.5.

В большинстве производств используется вода, не содержащая солей жесткости и других ионов солей. Например, для современных паровых котлов требуется вода с общим солесодержанием менее 80 мг/л. Для паровых котлов ТЭЦ, а также для контуров АЭС вода не должна содержать солей более 0,05 мг/л. В электронной промышленности изготавливаемые микросхемы промываются глубоко обессоленной водой, качество которой определяется величиной удельного электрического сопротивления воды на уровне 18 МОм/см. В химической промышленности (приготовление химических реагентов и растворов), в фармацевтической промышленности (для приготовления лекарственных препаратов), в гальванической промышленности и других используется дистиллированная вода (обессоленная вода с солесодержанием 1 – 5 мг/л).

В пищевой промышленности используется частично обессоленная вода – умягченная и со сниженной щелочностью. Традиционно во всех видах промышленности использовался метод ионного обмена. Однако наличие солевых стоков регенерационных растворов и высокие стоимости реагентов в настоящее время ограничивают его применение. В качестве альтернативы методам ионного обмена используются мембранные методы обратного осмоса, электродиализе (электродеионизации) и их комбинации. Современные технологические схемы обессоливания разрабатываются с учетом экологических требований по сбросу рассолов с обессоливающих установок, и минимальных затрат на электроэнергию и реагенты.

Таблица 2.5

Классификация методов и технологий обессоливания

№ п/п	Процесс	Аппаратное оформление	Глубина обессоливания	Область применения
1	Дистилляция	Выпарные установки Адиабатные Парокомпрессионные	5 – 10 мг/л	Подготовка воды для химической и фармацевтической промышленности
2	Ионный обмен	Одноступенчатая схема Н-ОН	до 80 мг/л	Водоподготовка для паровых котлов
		Двухступенчатая схема обессоливания	до 1 мг/л	Вода для химических производств
		Трехступенчатая схема глубокого обессоливания	< 0,1 мг/л	Паровые котлы высокого давления ТЭЦ
3	Обратный осмос	Одноступенчатая система	> 2-3 мг/л	Системы опреснения морской и подземной воды;
		Двухступенчатая система	>= 1мг/л	Системы водоподготовки для различных отраслей промышленности
4	Электро-деионизация		Глубокое обессоливание воды	Солесодержание исходной воды – не выше 10 мг/л. Солесодержание обессоленной воды – 0,05 мг/л. Удельная электропроводность обессоленной воды менее 1 мкСм·см.
5	Электродиализ на биполярных мембранах		Разделение стоков ионообменных установок на кислые и щелочные растворы	Схемы ионообменного обессоливания, утилизация сбросных рассолов
6	Электродиализ	Электродиализ;	до 50 мг/л;	Технологические

	(в комбинациях с другими процессами)	электродиализ – ионный обмен; обратный осмос – электродеионизация; обратный осмос – электродеионизация – ионный обмен	общее солесодержание 0,1 мг/л, удельное электросопротивление воды до 18 МОм/см	схемы подготовки добавочной воды для котлов ТЭС, установки подготовки глубоко деионизованной воды для электронной промышленности
--	--------------------------------------	---	--	--

2.4.2. Выпаривание (дистилляционные методы)

Теоретические основы опреснения воды методом дистилляции.

Технология выпаривания известна давно как способ получить очищенную (дистиллированную) воду из растворов любой степени загрязненности. Эффективность такого метода достаточно высока, однако большие энергетические потери (на парообразование) часто делают эту технологию экономически нецелесообразной.

Большое развитие дистилляционные методы получили при разработке систем опреснения морской воды. Совершенствование систем дистилляционной очистки и рекуперация энергии (создание многоступенчатых адиабатных испарительных установок) делает этот метод достаточно эффективным и экономически целесообразным (при наличии дешевых источников энергии) особенно при больших расходах опресненной воды.

Метод дистилляции (испарения) используется также и в системах водоподготовки – ТЭЦ и при подготовке добавочной воды контуров АЭС. Испарительные системы оказываются экономически целесообразными при обработке вод с высокой степенью загрязненности – например, при высоких значениях солесодержания, цветности, содержания растворенных органических веществ – в тех случаях, когда альтернативные методы (например, ионный обмен) оказываются неэффективными.

При очевидной эффективности выпарных установок, они обладают высоким энергопотреблением. Кроме того, достаточно сложные конструкции

аппаратов, большие габариты и дорогостоящие материалы делают эксплуатационные затраты чрезвычайно высокими.

При нагревании соленой воды до температуры, более высокой, чем температура кипения воды данного солесодержания при данном давлении происходит процесс образования пара внутри объема жидкости, и вода начинает кипеть. Образующийся при кипении воды пар практически не содержит солей, поэтому при его конденсации образуется пресная вода. Этот процесс термического опреснения получил название дистилляции.

Для испарения 2 кг воды ее нужно нагреть до температуры кипения и затем сообщить дополнительно тепло, необходимое для фазового перехода воды в пар, так называемую скрытую теплоту парообразования, равную при температуре 100°C – 539,55 ккал/кг.

Для осуществления процесса выпаривания необходимо теплоту от теплоносителя передать кипящему раствору, что возможно лишь при наличии разницы температур между ними. Разницу температур между теплоносителем и кипящим раствором называют полезной разностью температур. В качестве теплоносителя в выпарных аппаратах чаще всего используют насыщенный водяной пар, который называют греющим или первичным.

При конденсации пара для его превращения в воду нужно отнять у пара тепло фазового перехода (539,55 ккал/кг), что возможно только тогда, когда температура поверхности конденсации ниже температуры насыщения, отвечающей данному давлению пара. Это тепло может быть в значительной степени рекуперировано. Степень рекуперации тепла фазового перехода характеризует экономичность различных типов дистилляционных опреснительных установок, отличающихся друг от друга организацией процесса кипения-конденсации и конструктивным исполнением.

Выпаривание проводят при атмосферном давлении, под вакуумом или под давлением, выше атмосферного.

Выпаривание под вакуумом имеет ряд преимуществ по сравнению с атмосферной выпаркой: снижается температура кипения, повышается полезная

разность температур, что ведет к снижению поверхности теплопередачи. При выпаривании под повышенным давлением (выше атмосферного) вторичный пар может быть использован в качестве греющего агента для различных технологических нужд.

Образующийся при выпаривании растворов пар называют вторичным или соковым.

В случае если в выпарной установке имеется один выпарной аппарат, такую установку называют однокорпусной или одноступенчатой. Если в установке используются два или более последовательно соединенных аппарата, то такую установку называют многокорпусной (многоступенчатой). В этом случае вторичный пар одной ступени используют для нагревания в других выпарных аппаратах той же установки, что приводит к существенной экономии свежего греющего пара. Вторичный пар, отбираемый из выпарной установки для других нужд, называют экстра-паром.

В многоступенчатых установках свежий пар подают только в первый аппарат. Из аппарата первой ступени образовавшийся вторичный пар поступает в аппарат второй ступени этой же установки в качестве греющего, в свою очередь вторичный пар второй ступени поступает в аппараты третьей ступени в качестве греющего пара и т.д.

Классификация, принципы работы и схемы опреснительных дистилляционных установок.

Дистилляционные установки различаются по:

- характеру использования тепла и степени его рекуперации: одноступенчатые и многоступенчатые;

- принципу использования давления испарители могут быть вакуумными, в которых кипение воды происходит под давлением ниже атмосферного. К таким установкам относят адиабатные и термокомпрессионные атмосферным или работающие под избыточным давлением выше атмосферного, в которых получаемый пар может быть использован в качестве греющего агента;

– принципу движения жидкости все типы испарителей разделяются на проточные, через которые испаряемая вода проходит один раз, и циркуляционные, в которых испаряемая вода циркулирует;

– в зависимости от взаимного направления движения раствора и греющего пара от аппарата к аппарату, разделяют прямоточные и противоточные выпарные установки, а также установки с параллельной или со смешанной подачей раствора в аппараты.

Одноступенчатые выпарные установки (рис. 2.19) представляют собой испаритель 1, в нагревательный элемент 2 которого от внешнего источника подводится тепло (обычно в виде пара) для испарения соленой воды. Образующийся при кипении опресняемой воды пар направляется в конденсатор 3, охлаждаемый исходной соленой водой, где конденсируется. Исходная соленая вода насосом 4 подается в трубки конденсатора, где нагревается за счет тепла конденсации пара. Прошедшая через конденсаторы нагретая вода сбрасывается в сток или используется для технологических целей, часть ее идет на подпитку испарителя. Для предотвращения загрязнения пара каплями кипящего рассола в испарителе имеется сепаратор 5 отделяющий капли жидкости от пара, идущего в конденсатор.

Загрязнение пара солями происходит за счет выноса капелек размером от 0,5 до 5 мкм, образующихся при лопании (разрушении, разрыве) паровых пузырьков выходящих с поверхности кипящей соленой воды. При кипении морской воды образующийся дистиллят содержит 20-40 мг солей в литре.

Многоступенчатые выпарные установки (рис. 2.20) имеют несколько последовательно соединенных аппаратов. В этом случае полученный вторичный пар первой ступени используют для нагрева воды в аппаратах следующих ступеней, что приводит к существенной экономии греющего пара. Таким образом, тепло конденсации пара предыдущей ступени используется для догрева и испарения воды в испарителе последующей ступени.

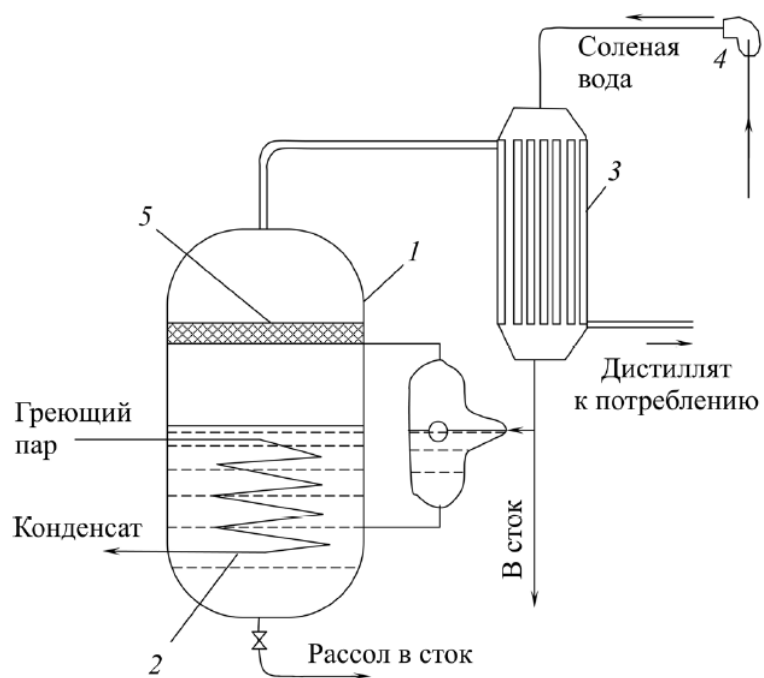


Рис. 2.19. Схема одноступенчатой испарительной установки:

1 – испаритель; 2 – нагревательный элемент; 3 – конденсатор; 4 – насос подачи соленой воды; 5 – сепаратор.

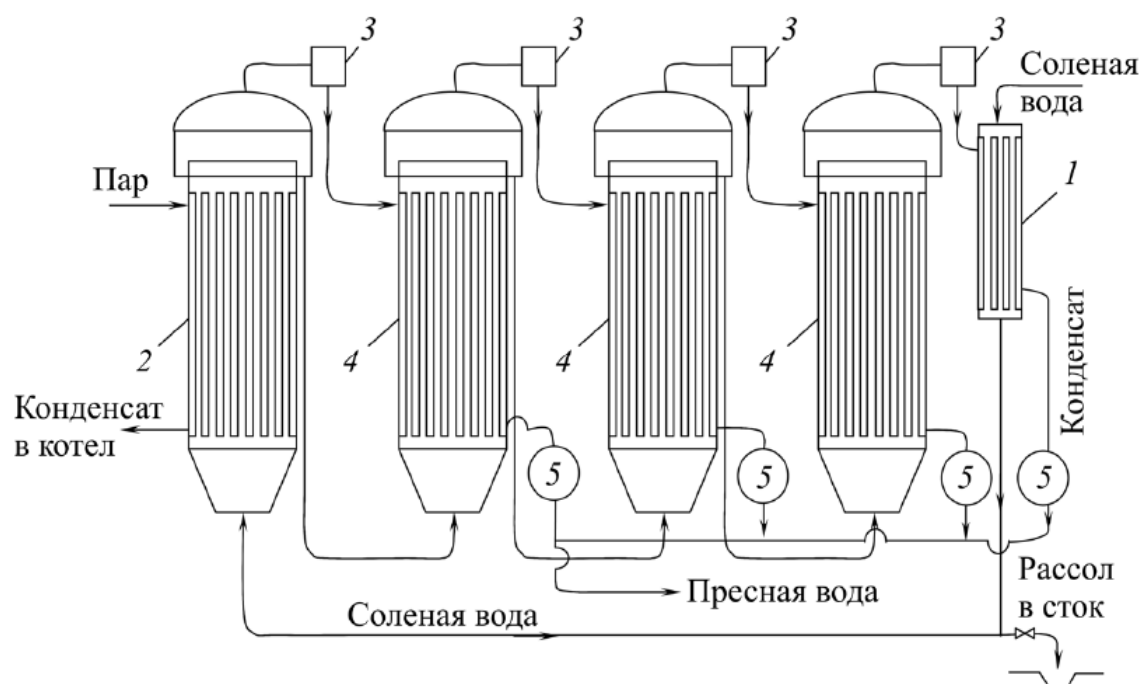


Рис. 2.20. Схема многоступенчатой испарительной установки с вертикально-трубными испарителями: 1 – концевой конденсатор; 2 – испаритель первой ступени; 4 – испарители; 3 – сепаратор; 5 – конденсатный насос.

В одноступенчатой установке 1 т конденсирующегося греющего пара позволяет получить 0,85 – 0,95 т опресненной воды. При этом почти всё тепло фазового перехода теряется на бесполезный нагрев охлаждающей воды конденсатора. В многоступенчатых установках расход тепла на 1 т полученного дистиллята будет приблизительно равен $1/n$ от тепла фазового перехода, или $536/n$, где n – число ступеней установки.

Исходная соленая вода поступает в концевой (хвостовой) конденсатор 1, где, охлаждая пар последующей ступени, конденсирует его, нагреваясь за счет тепла конденсации. Часть воды сбрасывается, а часть поступает в первую ступень испарителя, где она с помощью греющего пара от парогенератора нагревается до температуры кипения. Греющий пар при этом конденсируется, и конденсат отводится в парогенератор. Пар, образующийся в первой ступени испарителя 2, поступает через сепаратор 3 во второй корпус испарителя, где он служит греющим паром. Не испарившаяся в первом корпусе испарителя соленая вода поступает во второй корпус испарителя, где нагревается за счет тепла конденсации пара и опять частично испаряется при меньших значениях давления и температуры. Конденсат пара из каждого корпуса отводится конденсатным насосом 5 в бак опресненной воды.

Показанная на рис. 2.20 схема многоступенчатой испарительной установки называется прямоточной.

Вторичный пар и частично упаренный раствор направляют из аппаратов 1 ступени в аппарат 2 ступени и т.д.

Прямоточные схемы выпарных установок по сравнению с другими циркуляционными обладают рядом преимуществ:

- перетекание упариваемой воды из аппарата в аппарат благодаря разности давлений идет самотеком, поэтому отпадает необходимость в применении перекачивающих насосов;

- температуры кипения воды и давления вторичных паров в аппарате каждой последующей ступени ниже, чем в аппарате предыдущей ступени, поэтому вода поступает в аппарат перегретой. Теплота, которая выделяется

при охлаждении перегретой воды до температуры кипения в аппарате последующей ступени, идет на дополнительное испарение воды. Это явление получило название самоиспарения.

Конденсат вторичного пара также оказывается перегретым и подверженным самоиспарению, поэтому дополнительно образующийся при самоиспарении конденсата предыдущей ступени пар направляется в последующую ступень в качестве греющего пара (рис. 2.20). Образование дополнительного пара происходит в самоиспарителе, куда направляется конденсат вторичного пара каждой ступени (кроме первой).

Недостатками прямоточной схемы выпарной установки являются понижение температуры кипения и повышение концентрации солей от первой ступени к последней. Это приводит к повышению вязкости раствора и, следовательно, к снижению интенсивности теплоотдачи при кипении, уменьшению коэффициента теплопередачи и, как следствие, к увеличению общей требуемой поверхности теплопередачи. Однако достоинства прямоточной схемы имеют решающее значение, что определило ее широкое распространение, особенно в опреснителях на морских судах.

Выпаривание под вакуумом имеет ряд преимуществ по сравнению с атмосферной выпаркой:

- снижается температура кипения раствора, что дает возможность не использовать дорогостоящие методы предотвращения накипеобразования и теплоизолирующие материалы
- повышается полезная разность температур, что ведет к снижению требуемой поверхности теплоотдачи выпарного аппарата
- снижаются потери тепла в окружающую среду (снижаются температуры стенок аппаратов)

К недостаткам процесса выпаривания под вакуумом относится:

- увеличение капитальных затрат на дополнительное оборудование – конденсатор, вакуум – насос и др.

– увеличение расхода греющего пара на 1 кг выпариваемой жидкости (вследствие снижения давления над раствором увеличивается значение теплоты парообразования).

Адиабатные испарители или испарители с мгновенным вскипанием типа «флеш» отличаются тем, что испарение воды происходит в камере, давление в которой поддерживается ниже, чем давление насыщенного пара при температуре, которую имеет поступающая в камеру исходная вода. Исходная вода поступает в камеру через сопло или отверстие. Испарение воды в адиабатных испарителях происходит как с поверхности капель воды при ее разбрызгивании из сопел, так и с поверхности воды, заполняющей нижнюю часть камеры испарителя.

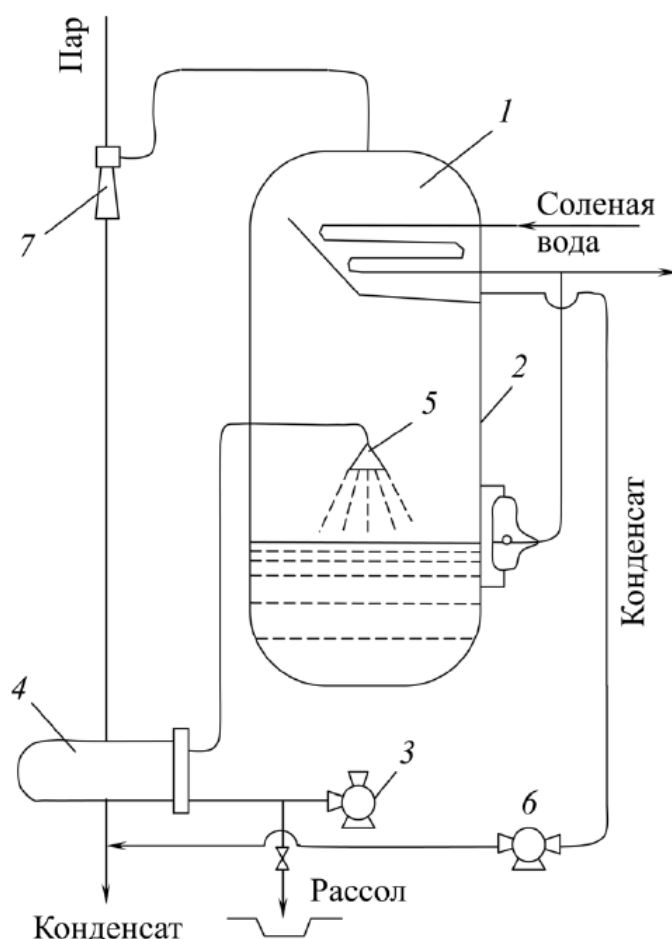


Рис. 2.21. Схема одноступенчатого адиабатного испарителя с принудительной циркуляцией:

1 – конденсатор; 2 – испаритель; 3 – циркуляционный; 4 – трубчатый подогреватель; 5 – сопло; 6 – насос откачки конденсата; 7 – паровой эжектор.

На рис. 2.21 представлена схема одноступенчатого адиабатного испарителя с принудительной циркуляцией. Исходная соленая вода для нагрева проходит конденсатор 1, откуда часть ее через регулятор уровня поступает в камеру испарителя 2. Циркуляционный насос 3 забирает воду из камеры испарителя и подает ее в трубчатый подогреватель 4, где вода подогревается паром. Подогреватель 4 располагается ниже зеркала воды в испарителе, вода в трубках подогревателя находится под дополнительным гидростатическим давлением и не кипит. Прошедшая подогреватель вода поступает в сопло 5, через которое разбрызгивается в корпусе испарителя. Так как давление в корпусе 2 поддерживается с помощью парового эжектора 7 ниже давления насыщенного пара, часть воды испаряется, пар поступает в конденсатор 1, где конденсируется на поверхности трубок, собирается в поддоне 8, откуда откачивается насосом 6.

В многоступенчатых адиабатных испарителях для экономии тепла соленая вода последовательно, начиная от аппарата последней ступени, проходит через конденсаторы всех камер испарителя, нагреваясь за счет тепла конденсации пара (рис. 2.22). Подогретая исходная вода сначала догревается в конденсаторе паровых эжекторов 3, поддерживающих вакуум в камерах испарителя, а затем в подогревателе 4, куда подводится тепло греющего пара. Нагретая вода из подогревателя поступает в первую камеру испарителя, которая служит одновременно деаэратором. Часть воды испаряется в первой камере, пар конденсируется на трубках конденсатора 5, расположенного в верхней части корпуса аппарата. Неиспарившаяся вода переливается во второй аппарат, где значения давления и температуры оказываются ниже, чем в первой камере. Неиспарившаяся во всех ступенях вода откачивается из последнего аппарата насосом 1 и сбрасывается в сток. Конденсат во всех аппаратах стекает с трубок конденсаторов в расположенные под ними корыта и из них насосом перекачивается в резервуар опресненной воды. Вследствие небольшой полезной разницы температур (70-80 °C) количество ступеней в таких установках доходит до 30-40.

Многоступенчатые адиабатные опреснительные установки нашли наибольшее распространение для опреснения морской воды, особенно в странах Ближнего Востока.

Термокомпрессионные испарители называют также парокomppressorными или испарителями с тепловым насосом.

Многоступенчатым выпарным установкам присущ ряд недостатков: высокая стоимость оборудования, большая занимаемая площадь, высокая температура кипения и др. Эти недостатки преодолеваются при выпаривании с тепловым насосом.

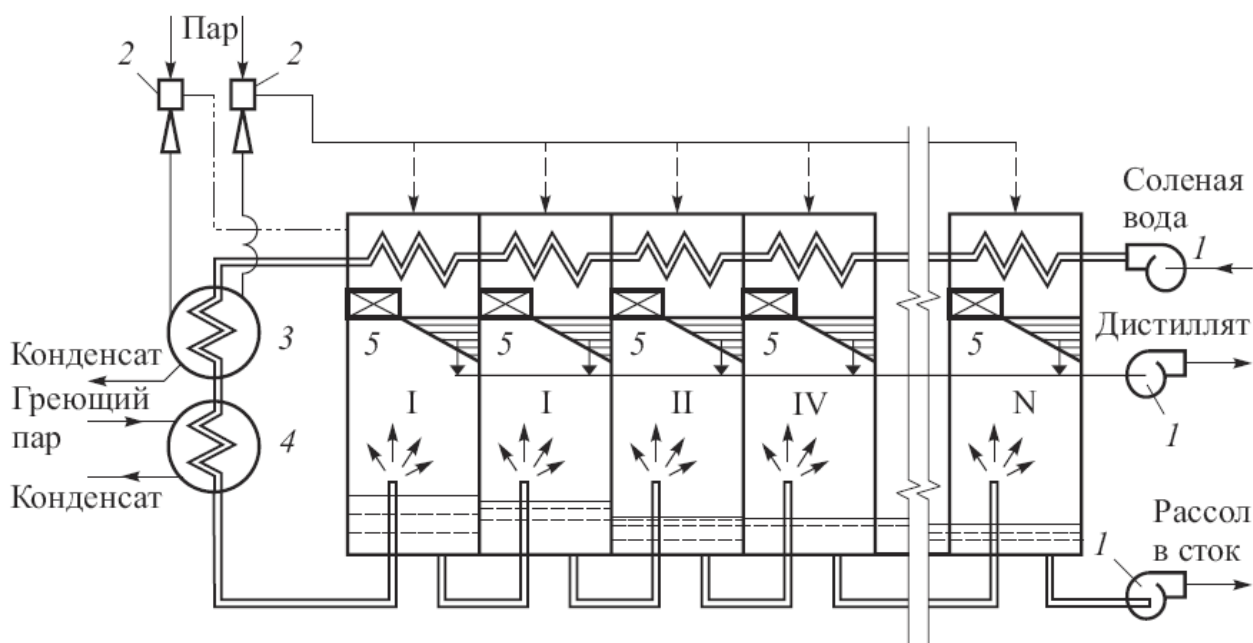


Рис. 2.22. Схема многокамерного противоточного адиабатного испарителя

Вторичный пар, образующийся при упаривании воды, с помощью турбокомпрессора или парового эжектора сжимается (компримирует) до величины давления греющего пара и вновь подают в нагревательную камеру этого же аппарата.

Нагретый после сжатия вторичный пар, конденсируясь, отдает тепло исходной воде. Таким образом, первичный греющий пар необходим в основном для пуска аппарата в работу, а затем — в небольшом количестве — для

компенсации снижения теплоты конденсации пара после его сжатия в тепловом насосе и потерь тепла в окружающую среду.

Принципиальная схема термокомпрессионного аппарата показана на рис. 2.23. Исходная соленая вода поступает в корпус испарителя 1, где в результате работы вакуум-компрессора 2 создается вакуум. Соленая вода кипит в вакууме, пары ее отсасываются вакуум-компрессором и сжимаются им. Механическая работа сжатия переходит в теплоту, пар нагревается до температуры более высокой, чем температура соленой воды в испарителе, и подается в рубчатый теплообменник, погруженный в испаряемую воду. При этом пар конденсируется, и тепло конденсации используется для испарения новой порции воды. Для запуска испарителя служит стартовый котел 3, который подает пар в нагреватель 4 для нагрева воды в первый период работы установки.

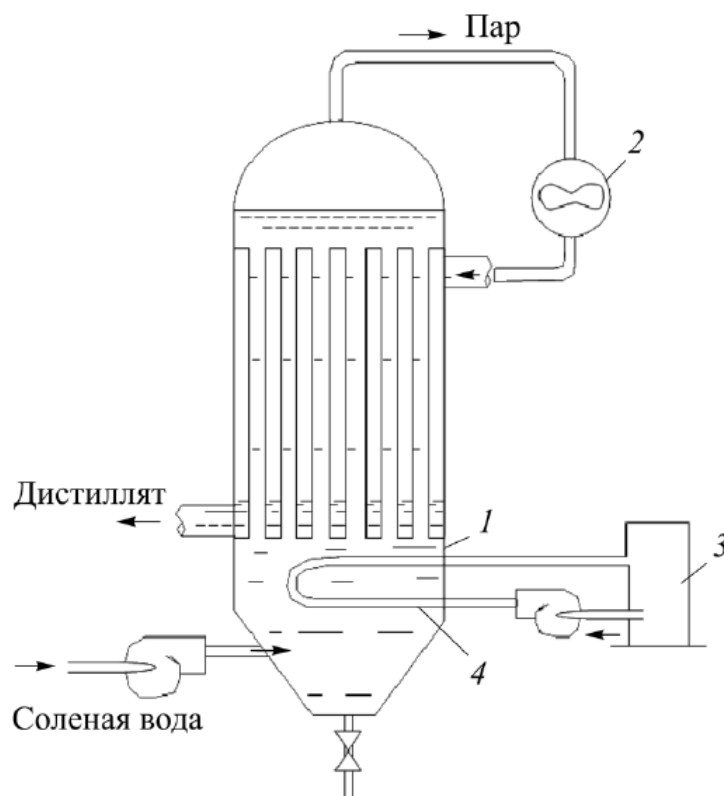


Рис. 2.23. Схема термокомпрессионного испарителя:

1 – корпус; 2 – вакуум-компрессор; 3 – стартовый котел; 4 – нагреватель.

Однако необходимость использования для работы дорогостоящей электрической энергии сужает область применения выпарных аппаратов с турбокомпрессорами. Экономически целесообразнее использование для этих целей более дешевых видов энергии, в частности, энергии пара, например, с помощью пароструйных инжекторов. В этом случае вторичный пар подают в инжектор, где он сжимается до давления греющего пара посредством рабочего первичного пара более высоких термодинамических параметров.

Парокомпрессионные установки часто успешно конкурируют с многоступенчатыми выпарными установками при небольших и средних производительностях по опресненной воде. Наибольшее распространение они получили на судовых опреснителях.

Наибольшее распространение в России для восполнения потерь питательной воды паровых котлов получили испарители типа «И», выпускаемые производственным объединением «Красный Котельщик», г. Таганрог (ГОСТ 10731-85). Увеличение производительности испарителя можно добиться с увеличением температурного напора – разности температур насыщения, соответствующих значениям давлений греющего и вторичного (образующегося) пара.

Современной и наиболее эффективной конструкцией аппаратов для дистилляции является конструкция горизонтально-трубного пленочного испарителя (рис. 2.24). Она представляет собой горизонтально расположенный пучок труб, которые снаружи орошаются жидкостью, стекающей по ним в виде тонкой пленки и испаряющейся за счет теплоты конденсации пара, поступающего внутрь трубок. Коэффициент теплопередачи в таких установках на порядок выше, чем при использовании нагревателей погружного типа.

Установки с горизонтально-трубными пленочными испарителями используются как для опреснения воды, так и для получения обессоленного дистиллята для систем водоподготовки ТЭС.

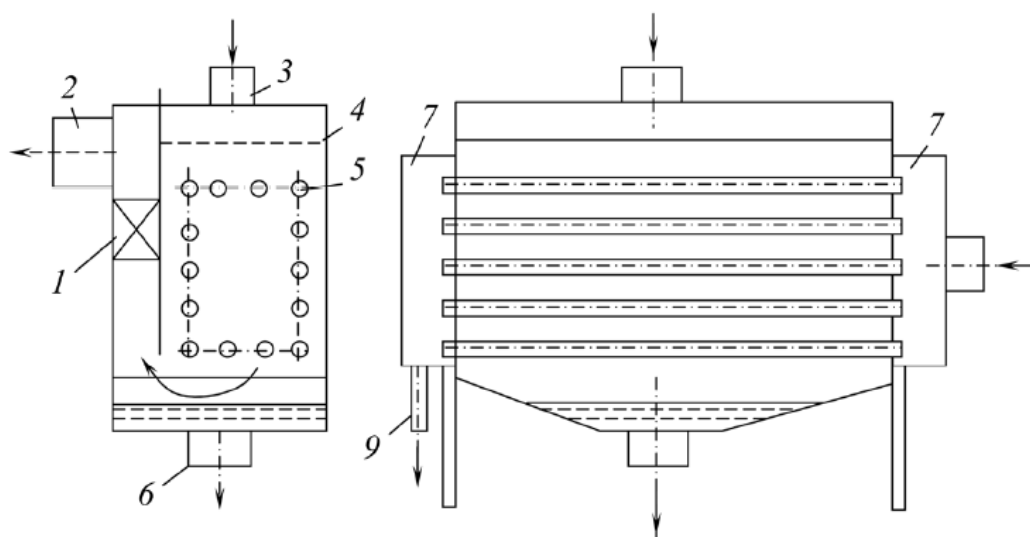


Рис. 2.24. Устройство горизонтально-трубного пленочного испарителя

1 – каплеулавливатель; 2 – патрубок выпада вторичного пара; 3 – подача исходного раствора; 4 – распределительное устройство; 5 – трубный пучок; 6 – выход упаренного раствора; 7 – паровая камера; 8 – подача греющего пара; 9 – выход конденсата.

Накипеобразование в испарителях. Методы предотвращения накипеобразования.

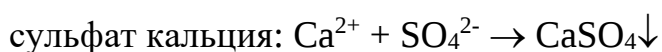
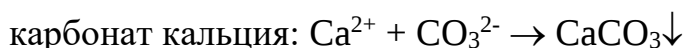
Опыт эксплуатации испарителей, обрабатывающих солоноватую или соленую воду, показывает, что серьезные проблемы вызывает интенсивное зарастание поверхностей теплообмена накипью – кристаллическими осадками малорастворимых в воде солей кальция и магния. Это обусловлено высокой жесткостью подземных и морских вод. Образование накипи на греющих теплопередающих поверхностях испарителей приводит к резкому снижению эффективности их работы, возникает необходимость частой остановки и чистки испарителей, что сопряжено с большими эксплуатационными расходами.

Основными соединениями, входящими в состав накипи, являются карбонат кальция, гидроксид магния и сульфат кальция. В ряде случаев в составе накипи обнаруживают силикаты кальция и магния. Слой накипи обладает низкой теплопроводностью, которая зависит от химического состава накипи и ее пористости.

Образование накипи в испарителях обусловлено двумя основными причинами: повышением при испарении воды концентраций

осадкообразующих ионов, и отрицательными значениями коэффициентов растворимости солей жесткости.

Повышение концентрации в испаряемой воде осадкообразующих ионов (Ca^{2+} , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} и др.) приводит к тому, что их содержание в воде превышает пределы их растворимости. Произведение активных концентраций ионов оказывается больше произведения растворимости этого соединения. В таком случае вода оказывается пересыщенной по этим соединениям, в результате чего образуются их осадки:



В первую очередь пересыщение воды возникает у поверхности нагрева вследствие того, что накипеобразующие соединения CaCO_3 , CaSO_4 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$ имеют отрицательный коэффициент растворимости, т.е. растворимость их уменьшается при повышении температуры воды.

Основным общепринятым требованием по предотвращению образования сульфатной накипи является неперевышение пределов ее растворимости в упариваемой воде. Значение коэффициентов активности и термодинамической константы растворимости зависят от температуры воды и ее ионной силы, определяемой общим солесодержанием.

Методы борьбы с образованием накипи в испарителях можно классифицировать следующим образом:

- а) ограничение пределов растворимости сульфата кальция;
- б) добавление зернистых присадок;
- в) подкисление исходной воды;
- г) применение антинакипинов (ингибиторов);
- д) умягчение питательной воды;
- е) контактная стабилизация – применение специальных конструкций;
- ж) испарителей для уменьшения накипеобразования;
- з) гидрофобное покрытие поверхности теплопередачи.

Антинакипинами или ингибиторами называют реагенты, добавляемые в исходную испаряемую воду для предупреждения образования накипи или замедления процесса ее роста. По характеру своего действия в дистилляционных опреснительных установках антинакипины могут задерживать рост кристаллизующейся накипи или осаждать образующиеся малорастворимые соли CaCO_3 , CaSO_4 , Mg(OH)_2 в виде шлама.

Антинакипины дозируются в исходную воду в количестве 1-10 мг/л и представляют собой полимеры. Механизм действия ингибирующих веществ состоит в адсорбировании органических молекул на поверхностях теплопередачи и поверхностях кристаллов накипи, блокируя дальнейший кристаллический рост. При адсорбции антинакипинов грани зародышевых кристаллов покрываются мономолекулярной пленкой органического вещества, что препятствует их дальнейшему росту. Зародыши кристаллов, образовавшиеся в объеме раствора, остаются во взвешенном состоянии и выводятся из установки в виде шлама.

Как показывает опыт эксплуатации опреснителей, применение ингибиторов полностью не предотвращает, но снижает скорости накопления накипи, т.е. уменьшается количество отложений за определенный период работы установки.

В качестве антинакипинов используются органические вещества различного состава и молекулярного веса. Проводятся работы по синтезу новых ингибиторов для повышения эффективности их действия. Наилучшей эффективностью обладают следующие классы ингибирующих веществ:

- полиакрилаты (полиэлектролиты);
- полифосфаты (пирофосфат натрия, гексаметафосфат натрия);
- органофосфонаты – соли фосфорной кислоты;
- ряд ингибиторов, основанных на соединениях малеиновой кислоты, а также итаконовой кислоты.

Одним из эффективных методов борьбы с накипеобразованием в испарителях является добавление в испаряемую воду тонкодисперсных

присадок или затравок. При добавлении к испаряемой воде зернистой присадки ее частицы обеспечивают центры кристаллизации накипеобразователя, на которых происходит кристаллизация основной части накипи. Благодаря этому накипь не образуется на поверхности теплопередачи. В качестве присадок используются различные измельченные тонкодисперсные порошки: мела, гидроокиси магния, измельченная накипь. Крупность частиц составляет 10-40 мкм.

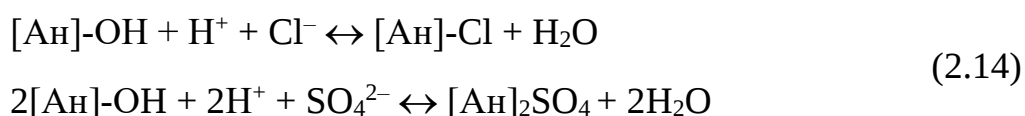
Метод контактной стабилизации заключается в циркуляции рассола через фильтры, загруженные специальной контактной массой (из зерен известняка или другого аналогичного материала), служащие для непрерывного выделения из рассола накипеобразующих соединений, осаждающихся на контактной массе. Эффективность снижения пересыщения рассола зависит от многих факторов – степени пересыщения рассола, времени прохождения рассола через слой контактной массы, крупности контактного материала. Наиболее важно, чтобы время контакта рассола с массой, загруженной в фильтры, соответствовало скорости кристаллизации накипеобразующих веществ для данных условий работы испарителя.

Для снижения концентраций накипеобразующих веществ в питательной воде испарителей используется ряд методов умягчения. Умягчение оправдано для подготовки питательной воды испарителей, работающих при высоких температурах и высоких степенях упаривания. Известные реагентные методы умягчения морской воды из-за большой стоимости реагентов и эксплуатационных трудностей не нашли практического применения. За счет повышения степени упаривания рассола затраты на ионообменное умягчение не только окупаются, но и позволяют снизить себестоимость опресняемой воды на 30%.

2.5. Ионообменные методы опреснения и обессоливания воды

Ионнообменный метод опреснения и обессоливания воды основан на последовательном фильтровании воды через Н-катионитовые и ОН-аннионитовые фильтры. Основы работы катионообменных фильтров описаны в разделе 2.3.

Аниониты – иониты, представляющие собой нерастворимые в воде соли и основания с закрепленными на матрице катионитами или анионообменными группами, обменивающиеся в растворах анионами. Анионы функциональных групп анионита (которыми анион был предварительно заряжен) способны обмениваться с анионами из раствора в соответствии с реакциями:



Символом [Ан] обозначена нерастворимая в воде матрица анионита, играющая роль катиона. Условно считают катион [Ан] анионита одновалентным.

В зависимости от степени диссоциации ионогенных групп различаются сильно-, средне- и слабоосновные аниониты.

Сильноосновные аниониты сорбируют все анионы солей из раствора. Они способны обменивать ОН-ион своей активной группы на анионы растворенных в воде солей сильных кислот. Эти аниониты поглощают из воды аниониты кремневой, угольной и других слабых кислот при отсутствии в воде сильных кислот и их солей.

Сильноосновные аниониты наиболее эффективны при значениях рН раствора от 0 до 10. Ряд селективности для стандартного анионита типа АВ-17-8 выглядит следующим образом:



Для регенерации сильнокислотных анионитов используются только концентрированные растворы щелочей, либо концентрированные растворы хлоридов или карбонатов, взятых с большим избытком по сравнению со стехиометрическим количеством.

Таблица 2.6

Технологические характеристики анионитов

Анионит, марка	Тип ионогенных групп	Степень диссоциации	Рабочий диапазон рН	Размер зерен в мм	Полная обменная способность г-экв/м ³ по SO ₄ ²⁻ /SiO ₃ ²⁻
AB-17-8	Четвертичные аминогруппы –N-H ⁺	Сильноосновной	0 – 14	0,2– 0,85	800/400
АН-31	Вторичные и третичные аминогруппы	Слабоосновной	0 – 7	0,3 – 1,6	1000/-
АН-2ФГ		Слабоосновной	0 – 7	0,4 – 2	1500/-
Amberlite IR-4B	– // –	Сильноосновной	0 – 7	0,3– 0,85	1500/-
Amberlite IRA-410		Слабоосновной	0 – 14	0,3– 0,85	1100/350
Dowex-1	– // –	Сильноосновной	0-14	0,3- 0,85	1500
Purolite A845	– // –	Сильноосновной	0-14	Моно	1400
Amberlite Amberjet 1200		Сильноосновной	0-14	Моно	1200
Dowex marathon A, APCORE mono A- 625		Сильноосновной	0-14	Моно	1200

Для регенерации сильнокислотных анионитов используются только концентрированные растворы щелочей, либо концентрированные растворы хлоридов или карбонатов, взятых с большим избытком по сравнению со стехиометрическим количеством.

Сильноосновные аниониты в ОН-форме используются в схемах полного обессоливания воды в основном для доочистки воды от анионов слабых кислот. В схемах глубокого обессоливания через аниониты фильтруют воду, предварительно прошедшую через Н-катионитовые фильтры и очищенную от катионов. Аниониты в Cl-форме могут поглощать из воды такие анионы, как HCO_3^- , NO_3^- , SO_4^{2-} .

При фильтровании через ОН-анионит воды, прошедшей через Н-катионитовый фильтр, в которой катионы заменены на ионы H^+ , происходит обмен анионов OH^- на анионы Cl^- и SO_4^{2-} (2.14).

Бикарбонат-ионы HCO_3^- в поступающей на анионитовый фильтр воде обычно отсутствуют, т.к. образующаяся при Н-катионировании углекислота удаляется в дегазаторе, установленном после Н-катионитовых фильтров.

На рис. 2.25 и 2.26 показаны выходные кривые сорбции анионов и формирование фронтов сорбции в анионитовых фильтрах.

Анионы слабых кислот (кремневой и угольной) сорбируются сильноосновными анионитами, но только при отсутствии в воде сильных кислот и их солей. Поэтому в схемах полного обессоливания воды сильноосновные аниониты обычно используются на II ступени для удаления из воды анионов слабых кислот.

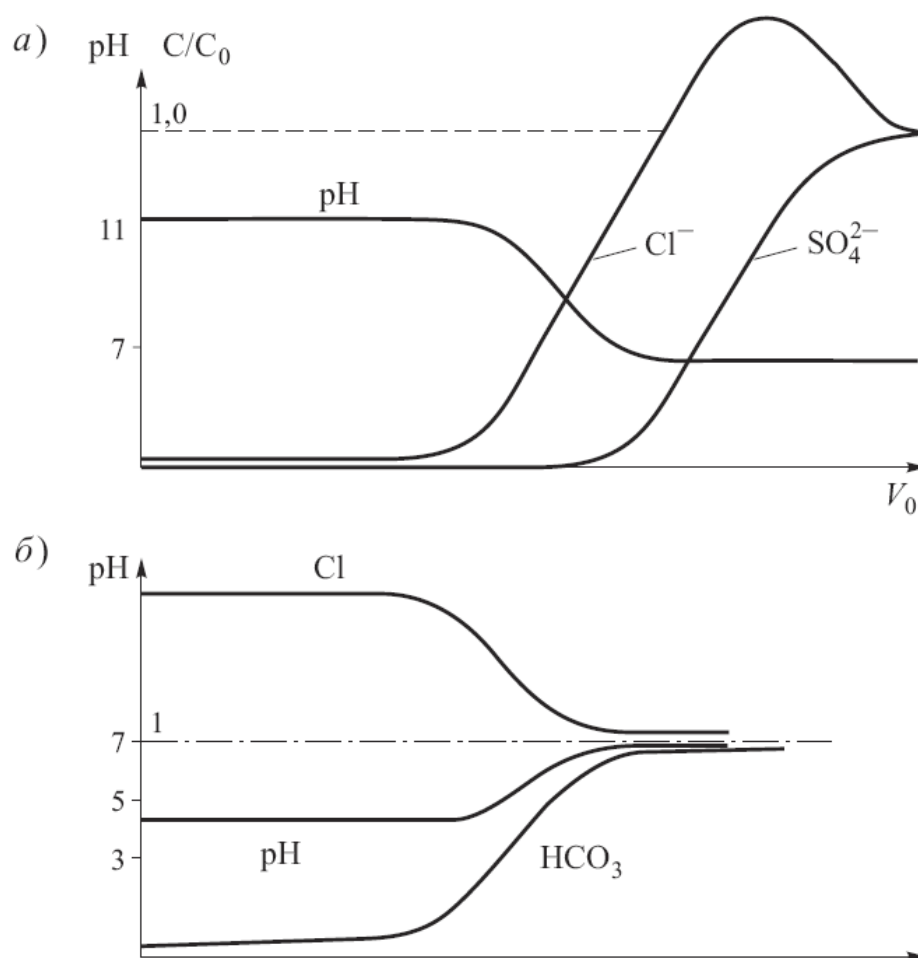


Рис. 2.25. Выходные кривые сорбции анионов Cl^- и SO_4^{2-} на анионите в OH^- форме (а) и в Cl^- – форме (б) C/C_0 – отношение текущей концентрации иона к исходной; V_0 – объем профильтрованной воды

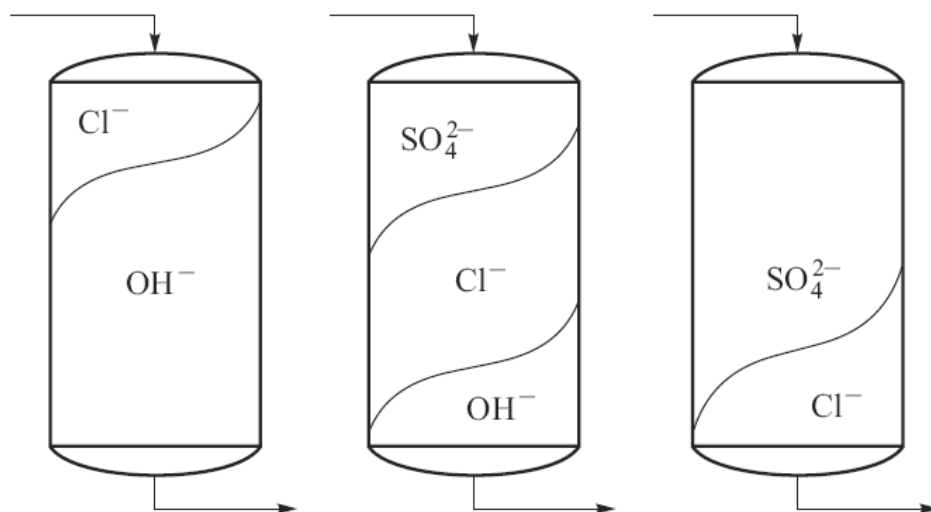
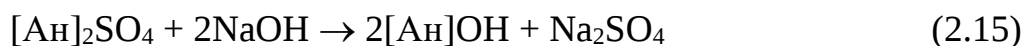


Рис. 2.26. Формирование в анионите в OH^- - форме фронтов сорбции анионитов.

Анионитовые фильтры регенерируют 2-4%-ным раствором щелочи:

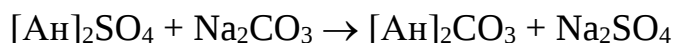
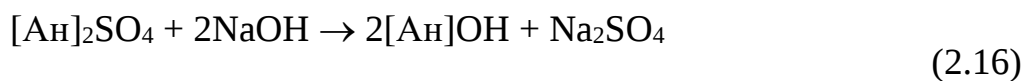


Отмытые от продуктов регенерации анионитовые фильтры снова включают в работу.

Слабоосновные аниониты сорбируют только анионы сильных кислот в кислых средах.

Слабоосновные аниониты обладают значительно большей, чем сильноосновные, обменной емкостью. Их емкость и ряд селективности сильно зависят от pH раствора.

Слабоосновные аниониты имеют высокое сродство к гидроксил-ионам. Поэтому такие аниониты могут извлекать анионы только из кислых сред и регенерируются разбавленными растворами щелочей, взятых практически в стехиометрическом количестве. Реакции регенерации слабоосновных анионитов растворами щелочи или кальцинированной соды выглядят следующим образом:



В схемах глубокого обессоливания слабоосновные аниониты обычно используют на первой ступени после Н-катионовых фильтров для удаления анионов сильных кислот.

Ряд слабоосновных анионитов (например, на основе полиакрилатов) обладают способностью обратимо поглощать природные органические кислоты, что дает возможность использовать их как органопоглотители (скавенджеры).

При обессоливании из раствора удаляются все ионы солей. Степень удаления каждого компонента зависит от селективности ионита. Подбирая тип ионита, режим регенерации и количество ступеней, можно добиться необходимой глубины обессоливания.

Обессоливание может проводиться в одну, две, три ступени. В каждой ступени раствор последовательно сначала проходит через катионит в Н-форме,

а затем через анионит в ОН-форме. При этом из раствора извлекаются катионы и анионы.

Одноступенчатая схема частичного обессоливания, включающая фильтры с сильнокислотным катионитом и сильноосновным анионитом показана на рис. 2.27,а. Такая схема обеспечивает снижение солесодержания в 10-50 раз.

Емкость сильноосновного анионита по карбонат-ионам имеет невысокое значение, поэтому для повышения эффективности очистки из воды удаляют углекислоту, снижая тем самым количество образующихся карбонат и бикарбонат-ионов. Для удаления углекислоты вода, прошедшая катионит, имеющая кислую реакцию и содержащая углекислоту в виде свободной CO_2 , поступает в декарбонизатор. Одноступенчатая схема с декарбонизатором представлена на рис. 2.27,а. Обессоливание воды по одноступенчатой схеме неэкономично из-за необходимости отключения Н-катионитовых фильтров на регенерацию по проскоку натрия, что ведет к высоким удельным расходам кислоты и щелочи.

При использовании слабоосновного анионита несколько повышается обменная способность по анионам, но содержание растворенной кремнекислоты не снижается. Одноступенчатая схема позволяет снизить общее солесодержание до 2-10 мг/л.

При использовании двухступенчатого Н-катионирования удастся повысить экономичность схемы частичного обессоливания. Фильтр I ступени отключают на регенерацию при снижении кислотности фильтрата на 20%, а фильтр II ступени работает до проскока натрия в фильтрат. Анионитовый фильтр загружают сильноосновным анионитом, что позволяет снизить содержание кремниевой кислоты до 0,05-0,15 мг/л. Общее солесодержание воды снижается до 1-3 мг/л.

Таблица 2.7

Основные схемы обессоливания воды и технологии регенерации

№ п/п	Название процесса, схема	Качество очищенной воды	Тип ионитов, типы регенерации
----------	-----------------------------	----------------------------	----------------------------------

1	Одноступенчатая схема частичного обессоливания	Общее солесодержание – до 2-10 мг/л	Сильнокислотный катионит – слабоосновной анионит. Прямоточная регенерация.
2	Двухступенчатое Н-катионирование-анионирование	Общее солесодержание – 1-3 мг/л; SiO ₂ – 0,05-0,15 мг/л	Сильнокислотный катионит – сильноосновной анионит. Прямоточная регенерация.
3	Двухступенчатая схема обессоливания	Общее солесодержание – до 0,1-0,2 мг/л; SiO ₂ – 0,02-0,1 мг/л	Сильнокислотный катионит – слабоосновной анионит. Сильнокислотный катионит – сильноосновной анионит. Прямоточная регенерация.
4	Трехступенчатая схема обессоливания	Удельное сопротивление 18 МОм·см	Сильнокислотный катионит – слабоосновной анионит. Сильнокислотный катионит – сильноосновной анионит. Прямоточная регенерация.
5	Схема полного обессоливания с ФСД	То же	Те же
6	Схемы с последовательно установленными слабыми и сильными ионитами	То же	Сильнокислотный катионит – слабоосновной анионит. Сильнокислотный катионит – сильноосновной анионит – ФСД. Прямоточная регенерация.
7	Схемы с противоточной регенерацией	То же	Сильнокислотный катионит – сильноосновной анионит – ФСД. Прямоточная регенерация.
8	Схемы с последовательным использованием ионитов послойно с противоточной регенерацией	То же	Слабокислотный катионит – сильноосновной анионит. Слабокислотный катионит – сильноосновной анионит – ФСД. Прямоточная регенерация.

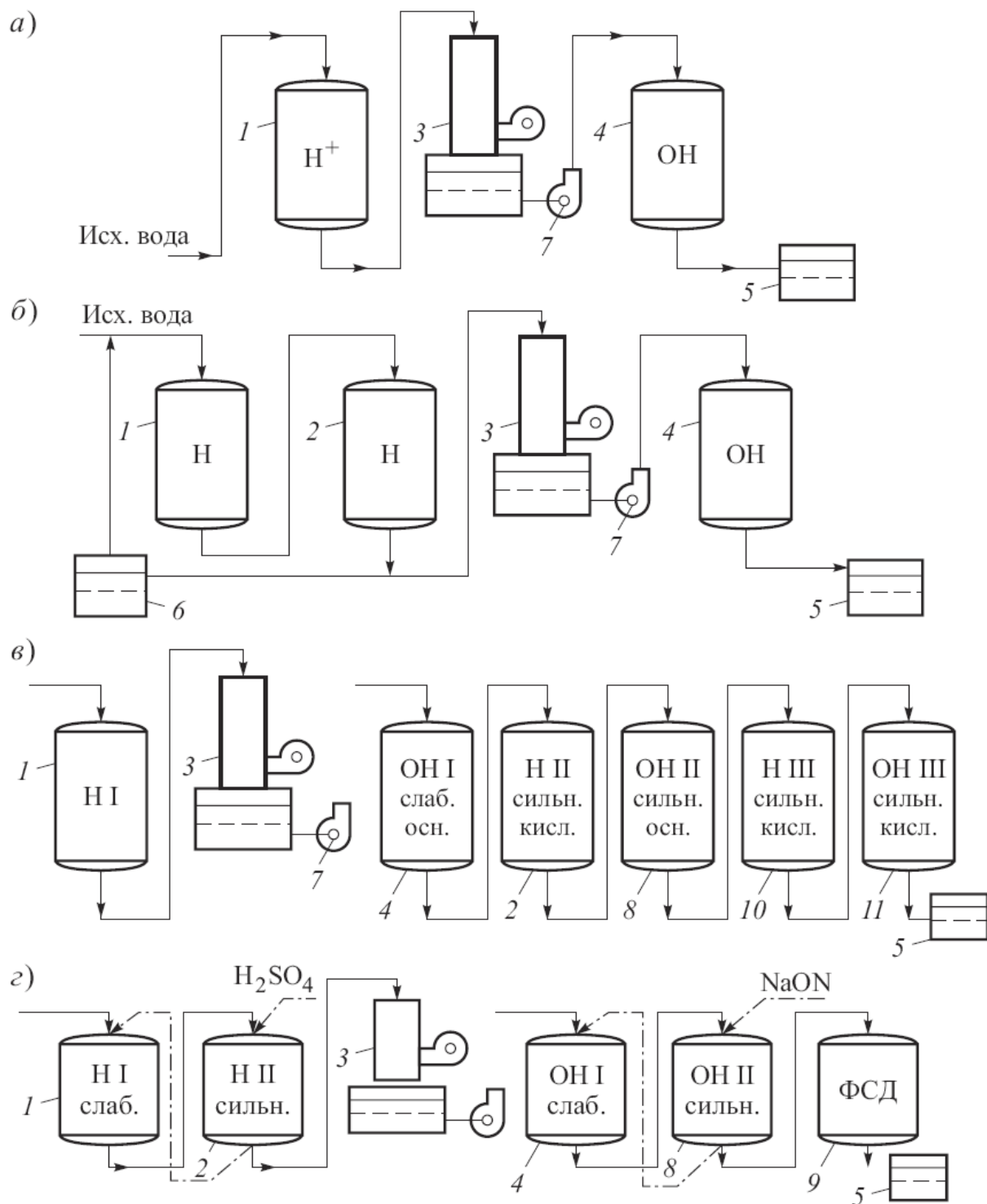


Рис. 2.27. Технологическая схема обессоливания воды:

- а) схема частичного обессоливания в одну ступень; б) схема с двухступенчатым Н-катионированием; в) трехступенчатая схема полного обессоливания воды; г) схема полного обессоливания с ФСД; д) схема с противоточной регенерацией и ФСД. 1 – Н-катионитовый фильтр I ступени; 2 – Н-катионитовый фильтр II ступени; 3 – дозатор; 4 – анионитовый фильтр; 5 – бак обессоленной воды; 6 – бак регенерационного раствора кислоты для фильтров I ступени; 7 – насос; 8 – анионитовый фильтр второй ступени; 9 – фильтр смешанного действия; 10 – Н-катионитовый фильтр III ступени; 11 – ОН-анионитовый фильтр III ступени; 12 – бак отмывочной воды анионитовых фильтров.

Для глубокого обессоливания воды используют две или три последовательные ступени. При использовании двух ступеней Н-катионирования, на первой ступени слабоосновного анионита и на второй ступени – сильноосновного анионита, общее солесодержание воды может быть снижена до 0,1-0,2 мг/л, в том числе содержание кремниевой кислоты до 0,02-0,1 мг/л. Двухступенчатая схема обессоливания показана на рис. 2.27,б. Полное обессоливание воды достигается на трехступенчатой установке, показанной на рис. 2.27,в.

Исходная вода проходит Н-катионитовый фильтр I ступени, загруженный сильнокислотным катионитом и поступает в дегазатор, в котором производится удаление образующейся углекислоты. Вода, освобожденная от растворенной углекислоты, собирается в бак и из него насосом подается в анионитовый фильтр I ступени, загруженный слабоосновным анионитом. Фильтрат анионитового фильтра I ступени поступает в Н-катионитовый фильтр второй ступени, загруженный сильнокислотным катионитом. Из катионитового фильтра II ступени вода подается в анионитовый фильтр II ступени, загруженный сильноосновным анионитом. Этот фильтр предназначен для удаления из частично обессоленной на I ступени воды растворенной кремниевой кислоты. Сильноосновный анионит в фильтре II ступени регенерирует раствором едкого натра – сначала 2-3%, затем 0,2-0,3%.

Фильтр III ступени Н-катионирования служит для удаления из воды остаточных количеств натрия, который может попасть в воду при недостаточно полной отмывке слабоосновного анионита после регенерации.

Н-катионитовый фильтр III ступени регенерирует 1-2%-ным раствором серной кислоты. Наличие в Н-катионитового фильтра III ступени позволяет уменьшить расход обессоленной воды на отмывку анионитового фильтра II ступени и повысить экономичность работы всей установки.

Фильтр III ступени анионирования предназначен для удаления из воды продуктов растворения и разрушения катионитов, а также для повышения

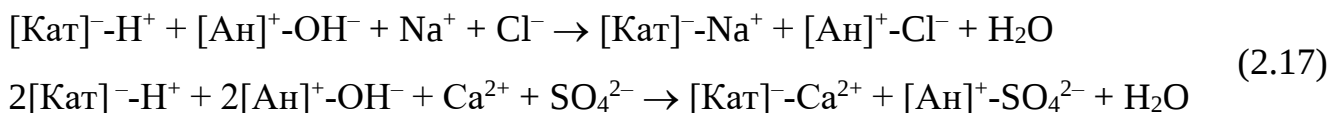
степени использования анионита фильтров II ступени, которые при наличии анионитовых фильтров III ступени можно выключать на регенерацию не по проскоку в фильтрат кремниевой кислоты, а позднее, после достижения ее концентрации в фильтрате значения 0,1-0,2 мг/л.

Регенерация анионитовых фильтров III ступени производится водным раствором аммиака (2-4%), т.к. при регенерации их раствором едкого натра существует опасность попадания натрия в обессоленную воду из отмывочной воды в начале фильтроцикла.

Трехступенчатая схема ионитового обессоливания позволяет снизить общее солесодержание воды со 100-500 мг/л до 0,05-0,1 мг/л, в том числе кремниевой кислоты до 0,02-0,05 мг/л.

Вместо H^+ и OH^- -фильтров III ступени в схемах для полного обессоливания воды может быть применен фильтр со смешанной загрузкой из катионита и анионита (фильтр смешанного действия). Применение смешанного слоя ионитов обеспечивает более высокий эффект обессоливания, чем при отдельной обработке (рис. 2.27,г).

В слое зерен ионитов протекают необратимые реакции:



При этом процессе отсутствует противоионный эффект и из воды при проходе через слой смеси ионитов извлекаются все содержащиеся в воде ионы. Благодаря высокому эффекту обессоливания достигается работа фильтра смешанного действия при высоких скоростях потока. Схема устройства и работы фильтра смешанного действия (ФСД) показана на рис. 2.28. Фильтр смешанного действия отличается от обычного катионитового фильтра наличием на дне системы подачи сжатого воздуха (для смешивания ионитов) и дополнительной распределительной системы для подачи регенерационного раствора кислоты внутрь слоя загрузки на границе раздела катионита и анионита. В фильтр смешанного действия сначала загружают катионит. Толщину слоя катионита принимают такой, чтобы распределительная система,

располагаемая в загрузке, была покрыта тонким слоем катионита. Поверх катионита загружают слой анионита. Катионит и анионит в фильтре перемешивают с помощью подачи в нижнюю распределительную систему сжатого воздуха.

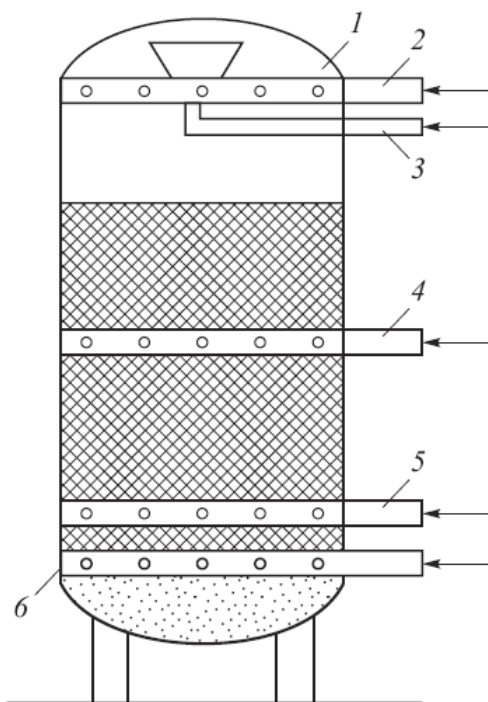


Рис. 2.28. Устройство фильтра смешанного действия:

1 – корпус фильтра; 2 – распределительная система раствора щелочи; 3 – трубопровод обессоливаемой воды; 4- распределительная система раствора кислоты; 5 – распределительная система сжатого воздуха; 6 – дренажная система

После насыщения ионитов содержащимися в воде анионами и катионами фильтр регенерирует. Перед проведением процесса регенерации смесь ионитов необходимо разделить на слои катионита и анионита. Разделение ионитов производится гидродинамическим методом.

Катионит и анионит имеют, как правило, некоторое различие в плотности. Плотность гранул стандартного катионита КУ-2-8 составляет 1,18-1,23 г/мл. Плотность анионита АВ-17-8 равна 1,06-1,09 г/мл. При этом зерна катионита должны иметь несколько больший размер, чем зерна анионита, благодаря чему возрастает эффективность разделения смол. Для эффективного разделения

гранулы (зерна) ионитов должны быть одинакового размера. Современные производители ионообменных смол (фирмы “Dow Chemical”, “Purolite”, “Bayer”, “Rohm and Haas”) выпускают монодисперсные иониты с гранулами сферической формы, специально подобранные и отсортированные по плотности и размеру.

Разделение катионита и анионита для их регенерации достигается путем их взрыхления (подачи воды в нижнюю распределительную систему фильтра). Интенсивность подачи воды составляет 6-8 л/м²сек, что обеспечивает создание псевдоожиженного слоя. При медленном снижении скорости подачи воды на взрыхление вначале оседают более тяжелые и крупные частицы катионита, а затем более мелкие зерна анионита. По мере износа и разрушения частиц ионитов эффективность их разделения падает, что ухудшает регенерацию и приводит к снижению качества обессоленной воды. При регенерации фильтра смешанного действия сначала через верхнюю распределительную систему подают раствор едкого натра, который проходит через слой анионита, затем слой катионита и выводится из фильтра. Интенсивность подачи едкого натра составляет 70-90 г/г-экв рабочей обменной емкости. Немедленно после пропуска раствора щелочи производят отмывку анионита обессоленной водой с подачей ее сверху вниз. Количество отмывочной воды составляет 6-8 м³ на 1 м³ анионита. После проведения отмывки ионита скорость подачи отмывочной воды снижают до значения 3-5 м/г и начинают подачу в фильтр через среднюю распределительную систему, расположенную над слоем катионита, раствора кислоты. Используют 3%-ный раствор серной кислоты или 5%-ный раствор соляной кислоты. Удельный расход кислоты на регенерацию катионита принимают из расчета 200-250 г серной кислоты на 1 г-экв рабочей обменной способности катионита. После пропуска всего раствора кислоты продолжают отмывку фильтра до исчезновения в промывной воде сульфат-ионов, а затем перемешивают катионит и анионит сжатым воздухом.

Фильтры смешанного действия серийно выпускаются Таганрогским заводом «Красный котельщик» диаметром 2,0 и 2,6 м. Они изготавливаются с внутренней и выносной регенерацией.

Эксплуатация ФСД состоит из следующих операций:

- работа фильтра в режиме обессоливания;
- регенерация состоит из ряда операций:
- взрыхление и разделение (стратификация) слоя;
- подача раствора едкого натра через верхнюю распределительную систему;
- отмывка анионита обессоленной водой;
- подача через среднюю распределительную систему регенерационного раствора кислоты.

При толщине слоя ионитов в фильтрах смешанного действия 2-2,5 м скорость фильтрования может достигать 30-50 м/ч. Фильтры смешанного действия позволяют получить более глубоко обессоленную воду, однако расходы реагентов на их регенерацию на 50-60% превосходят их расходы при регенерации отдельных катионитовых и анионитовых фильтров.

В ряде случаев при эксплуатации фильтров смешанного действия используют внешнюю (выносную) регенерацию. При выносной регенерации обессоливание производится в одном фильтре, а разделение и регенерация ионитов в другом аппарате, специально предназначенном для проведения соответствующих операций. Такой подход обеспечивает более высокие степени регенерации и, соответственно, глубину обессоливания.

Из-за сложности операций разделения смеси ионитов и их регенерации фильтры смешанного действия применяют в основном для глубокого дообессоливания воды в тех случаях, когда регенерация применяется редко. Наиболее широко такие фильтры применяются в схемах для получения сверхчистой воды с сопротивлением 18 МОм/см в микроэлектронике, а также в теплоэнергетике при производстве воды для котлов высокого давления.

В трехступенчатых схемах обессоливания для экономии отмывочной воды и реагентов отработанные регенерационные растворы и промывные воды фильтров II и III ступени используют для взрыхления и регенерации фильтров I ступени, для чего предусматривают соответствующие трубопроводы и баки.

За рубежом широко распространены схемы с последовательно установленными слабо и сильнодиссоциирующими ионитами (рис. 2.27,г).

При последовательном расположении фильтров со слабокислотным катионитом и сильнокислотным катионитом эффективнее используется их обменная емкость. Как уже говорилось, слабокислотные катиониты имеют очень большую обменную емкость (около 2000 мг-экв/л), поэтому на слабом катионите полностью задерживаются ионы жесткости и частично Na^+ , а на сильнокислотном — оставшиеся следовые количества катионов. При регенерации раствор кислоты (берущийся с избытком) пропускают через фильтр с сильнокислотным катионитом, после чего регенерат (отработанный регенерирующий раствор) используется для регенерации фильтра со слабокислотным катионитом. Слабоосновные аниониты также имеют высокую обменную емкость, но не удаляют анионы слабых кислот (кремневой, угольный). Поэтому, установив последовательно фильтры со слабо- и сильноосновным анионитом, удастся наиболее эффективно реализовать их свойства. На слабом анионите удаляется основная масса анионов, а на сильном извлекаются оставшиеся анионы. В результате обеспечивается высокое значение рабочей обменной емкости при заданном качестве обессоленной воды.

При регенерации анионитовых фильтров раствор щелочи вначале пропускается через фильтр с сильноосновным анионитом, после чего регенерат, содержащий избыток щелочи, подается на фильтр со слабоосновным анионитом. Как уже отмечалось выше, для регенерации слабоосновного анионита используются стехиометрические количества щелочи. В результате щелочь используется наиболее полно. Описанные схемы позволяют сократить габариты фильтров, количества используемых анионитов и резко уменьшить расходы реагентов для регенерации.

Современные схемы глубокого обессоливания воды (для ТЭЦ) используют технологии противоточной регенерации. Как уже говорилось, при использовании противоточной регенерации удастся добиться большей глубины обессоливания и экономии регенерационных растворов. При этом удастся достигнуть высокого качества (снижения солесодержания до 0,1-0,2 мг/л) обессоленной воды не в две, а в одну ступень. Поэтому вместо описанной выше «классической» трехступенчатой схемы обессоливания (две ступени и ФСД) используются две ступени обессоливания (рис. 2.27,д): фильтр с сильнокислотным катионитом, фильтр с сильноосновным анионитом и ФСД. Применение технологии противоточной регенерации особенно успешно осуществляется при реконструкции цехов химводоподготовки ТЭЦ, когда необходимо уменьшить количество фильтров и освободить площади, либо удвоить производительность станции при том же количестве фильтров.

Применяемые при глубоком обессоливании воды сильноосновные аниониты сорбируют из воды органические вещества, в результате чего обменная емкость поглощения снижается. Процесс сорбции анионитом органики носит практически необратимый характер. Поэтому для защиты сильноосновных анионитов от загрязнения органическими веществами вода перед обессоливанием должна проходить тщательную предочистку. Обычно это достигается с использованием коагуляционных методов. Во многих случаях такая обработка воды не позволяет достичь требуемых значений окисляемости на уровне 2-3 мг/л. Для эффективного снижения окисляемости используют также каталитическое окисление органических веществ и их сорбцию активным углем, применение мембранной очистки (систем ультрафильтрации, нанофильтрации).

При высоком содержании органических веществ используются специальные аниониты – органопоглотители («скавенджеры»), способные к обратимой сорбции органических веществ. Регенерация таких анионитов производится 10%-ным раствором поваренной соли. Слабоосновные аниониты значительно более устойчивы к действию природной органики.

Установки ионнообменного обессоливания оборудуют кислотным хозяйством обеспечивающим месячный запас реагента. В связи с тем, что железнодорожные цистерны, в которых поставляют серную кислоту, имеют грузоподъемность до 50-60 т (вместимость баков при плотности раствора 1,8 г/см³ составляет 28-33 м³), объем хранилищ должен обеспечивать их опорожнение. Кислотное хозяйство состоит из цистерн-хранилищ, мерников для концентрированной кислоты и вакуум-насосов (рис 2.18).

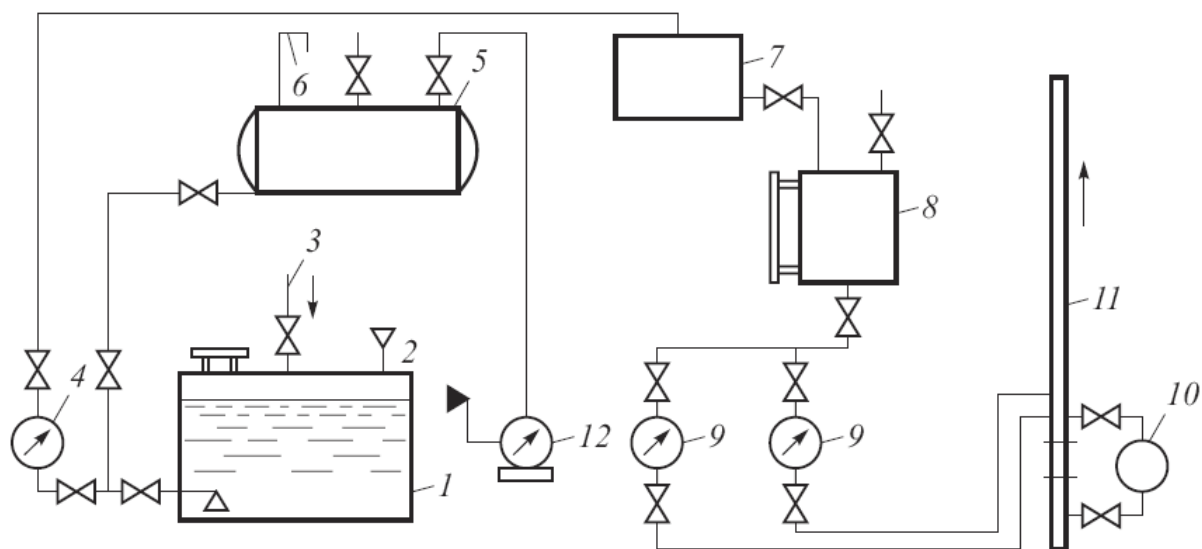


Рис. 2.29. Схема едконатрового хозяйства:

1 – бак для растворения твердого гидроксида натрия и приема его раствора; 2 – воронка для слива раствора гидроксида натрия из контейнера; 3 – подвод воды; 4 – насос; 5 – цистерна концентрированного раствора гидроксида натрия; 6 – сифон для заполнения цистерны; 7 – расходный бак; 8 – мерник; 9 – насос-дозатор; 10 – расходомер; 11 – трубопровод с водой, в котором образуется раствор гидроксида натрия заданной концентрации; 12 – вакуум-насос

Особенностью установок с анионитовыми фильтрами является необходимость аппаратуры для приготовления растворов кальцинированной соды, гидрокарбоната натрия и едкого натра. Возможно использование отработанных растворов едкого натра после регенерации анионитовых фильтров II ступени для регенерации слоя анионита на фильтрах I ступени. При этом регенерирующий агент будет один – гидроксид натрия. Схема едконатрового хозяйства показана на рис. 2.29.

2.6. Обессоливание воды с помощью мембранных технологий

2.6.1. Обессоливание воды обратным осмосом

Для обессоливания воды используют следующие мембранные процессы: обратный осмос, электродиализ и электродеионизация, прямой осмос, мембранная дистилляция. Наиболее широко распространен обратный осмос.

Первоначально процесс обратного осмоса разрабатывался для опреснения подземных и морских вод. Отличительной чертой процесса являлись высокие значения приложенных давлений – 50-60 бар, что вызывало высокую стоимость насосного оборудования, трубопроводов и арматуры и др. Прогресс в области производства мембран привел к созданию низконапорных мембран, работающих под низким давлением. Снижение величин рабочих давлений привело к значительному удешевлению и упрощению систем обратного осмоса.

В настоящее время обратноосмотические установки используются для обессоливания воды, вытесняя традиционные методы – ионный обмен, дистилляцию. Невысокая стоимость и простота мембранных систем сделали метод обратного осмоса конкурентоспособным с традиционными установками водоподготовки. Высокая эффективность в задержании органических веществ (образующих цветность воды) бактерий, вирусов, жесткости железа делает его перспективным для подготовки питьевой и технической воды.

Широко распространен процесс, получивший название «нанопрофильтрации» – разновидность обратного осмоса, в которых используются поры более крупного размера. Такие поры задерживают «крупные» многовалентные ионы железа, кальция, стронция, хрома, сульфат-ионы и т.д. на 80-90%, но слабо задерживают одновалентные ионы натрия, хлорида, бикарбоната – на 30-50%.

При проведении процесса обратного осмоса растворенные вещества (ионы солей) задерживаются мембраной, и далее с частью потока исходной воды сбрасываются (концентрат), а молекулы воды проникают через мембрану (фильтрат). Молекулы растворенной соли накапливаются у поверхности

мембраны, где её концентрация постепенно возрастает. Однако повышение концентрации соли у поверхности вызывает диффузию ионов от поверхности в объем раствора. Таким образом, в системе устанавливается стационарное состояние. Конвективный поток растворенной соли к мембране уравнивается суммой потоков через мембрану и от поверхности мембраны в объем раствора. В результате, вблизи поверхности мембраны образуется пограничный слой, в котором значение концентрации соли увеличивается по мере приближения к мембране. Этот эффект называется концентрационной поляризацией и является одной из причин, вызывающей выпадение (кристаллизацию) малорастворимых солей на поверхности мембраны (рис. 2.30).

Предположим, что на расстоянии d от поверхности мембраны концентрация растворного вещества равна C_0 и имеет то же значение, что и концентрация в объеме потока воды благодаря полному смешению. Вблизи поверхности мембраны образуется пограничный слой, в котором концентрация увеличивается по мере приближения к мембране, достигая максимального значения C_m у ее поверхности.

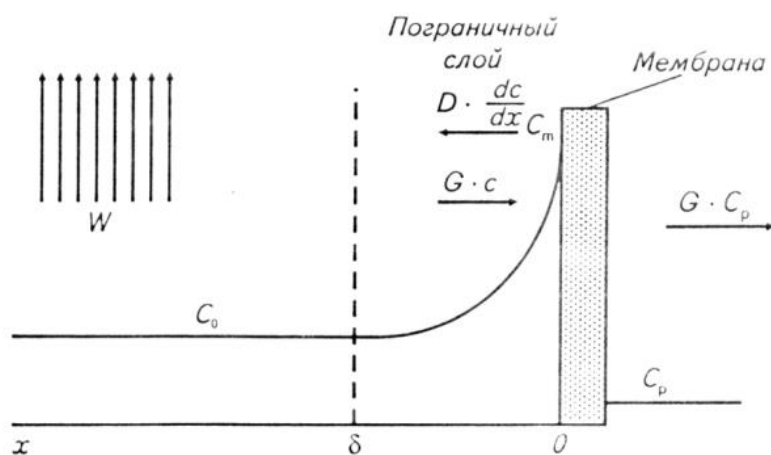


Рис. 2.30. Распределение задерживаемого мембраной вещества у поверхности мембраны.

Конвективный поток соли к поверхности мембраны обозначается как $J \cdot C$, где C – концентрация соли, г/л, J – удельная проницаемость мембраны, л/с·м².

Поскольку часть соли проходит через мембрану, поток через мембрану составляет $J \cdot C_\phi$, где C_ϕ – концентрация соли в фильтрате, г/л.

Накопление солей у поверхности мембраны вызывает диффузионный поток в обратном направлении – от мембраны в раствор. Таким образом, устанавливается стационарное состояние, равновесие, при котором поток растворенного вещества к мембране равняется сумме двух потоков: потока растворенного вещества через мембрану и диффузионного потока, определяемого законом Фика, т.е.:

$$J \cdot c + D \frac{dc}{dx} = J C_\phi, \quad (2.18)$$

где D – коэффициент диффузии, C – концентрации соли в потоке, изменяющиеся от C_ϕ до C_m .

При $x = 0$ $c = C_m$

При $x = \delta$ (на расстоянии δ от поверхности мембраны) $C = C_\phi$

Разделяя переменные и интегрируя уравнение (1) получаем

$$\int_{C_m}^{C_\phi} D \frac{dc}{dx} = \int J (C_\phi - C) \quad (2.19)$$

или

$$\ln \frac{C_m - C_\phi}{C_\phi - C_\phi} = \left(\frac{J \cdot \delta}{D} \right) \quad (2.20)$$

или

$$\frac{C_m - C_p}{C_\phi - C_p} = \exp \left(\frac{J \cdot \delta}{D} \right) \quad (2.21)$$

Отношение коэффициента диффузии к толщине пограничного слоя δ называется коэффициентом массопереноса k :

$$k = \frac{D}{\delta} \quad (2.22)$$

При условии, что растворенная соль полностью задерживается мембраной ($C_\phi = 0$), уравнение (2.21) упрощается и представляется в виде:

$$\frac{C_m}{C_\epsilon} = \exp\left(\frac{J}{k}\right) \quad (2.23)$$

Уравнение (2.23) является основным уравнением концентрационной поляризации, отражающим природу концентрационной поляризации: гидродинамика в аппарате определяется коэффициентом k , свойства мембран – величиной J .

Коэффициент массопереноса k зависит от гидродинамических условий (скорости потока на входе в мембрану V , коэффициента диффузии растворенного вещества D , вязкости, плотности), а также размеров и формы модуля.

Уровень концентрационной поляризации можно снизить двумя путями: изменить величину потока J и коэффициента массопереноса k . Коэффициент диффузии увеличить нельзя, но можно увеличить скорость движения раствора вдоль мембраны, за счет изменения формы и размеров модуля, снижая длину модуля или уменьшая сечение.

Кроме увеличения скорости течения для улучшения массопереноса можно «разрушить» пограничные слои с помощью «турбулизаторов» – сетчатых вставок в канал.

Поток воды через мембрану выражается уравнением:

$$J_w = A(\Delta P - \Delta \pi), \quad (2.24)$$

где A – константа проницаемости, P – давление воды над мембраной, $\Delta \pi$ – величина осмотического давления.

Поток воды через мембрану зависит от эффективной разницы давлений.

При стационарном режиме уравнения баланса масс можно записать в виде:

по воде:

$$Q_u = Q_\phi + Q_{\text{конц}} \quad (2.25)$$

по солям:

$$Q_u \cdot C_u = Q_\phi \cdot C_\phi + Q_{\text{конц}} \cdot C_{\text{конц}} \quad (2.26)$$

$$C_{\text{конц}} = \frac{C_u - \alpha C_\phi}{1 - \alpha} \quad (2.27)$$

где $\alpha = \frac{Q_\phi}{Q_u}$ – выход по фильтрату, т.е. доля, которую составляет фильтрат от всей воды, поступающей в установку (рис. 2.31).

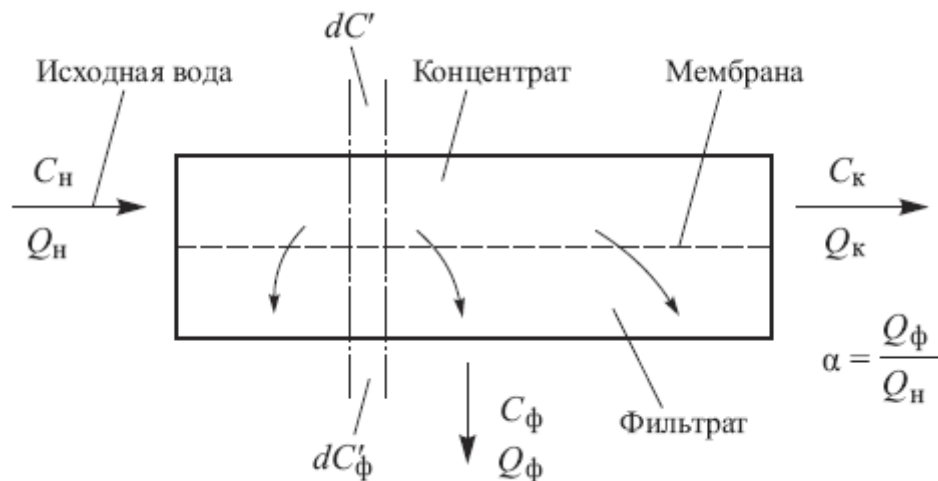


Рис. 2.31. Увеличение концентраций солей в воде, проходящей через мембранный аппарат.

Интегрирование от 0 до S и от C_u до C_k дает:

Из уравнения (2.27) путем записи в дифференциальной форме, разделения переменных и интегрированных для изменения концентрации солей в исходной воде от C_u до C_k и величины выхода фильтрата α от 0 до α получим:

$$C_k = C_u (1 - \alpha)^{-R} \quad (2.28)$$

и

$$C_\phi = C_u (1 - R)(1 - \alpha)^{-R} \quad (2.29)$$

Уравнение показывает, как концентрация солей в концентрате и фильтрате зависят от выбранной величины α и величины R .

Широко известными материалами мембран для обратного осмоса являются эфиры целлюлозы, в частности, диацетат целлюлозы и триацетат целлюлозы, ароматические полиамиды, полиэтерсульфон и др.

Различают два основных типа мембран: асимметричные мембраны и композитные мембраны. Асимметричные мембраны представляют собой пленку, нанесенную методом инверсии фаз (фазовым разделением) на подложку. Размер пор уменьшается от подложки к рабочей поверхности мембраны, обращенной к обрабатываемой воде.

Плотные асимметричные мембраны не позволяют добиться высоких значений производительности. Толщина мембраны (20-2000 мкм) оказывает существенное гидравлическое сопротивление. Более того, при увеличении величины рабочего давления асимметричные мембраны сжимаются, что приводит к снижению производительности.

Увеличение производительности таких мембран может быть достигнуто с помощью уменьшения эффективной толщины мембраны. Однако тонкая пленка (толщиной 0,1–1 мкм) не обладает механической прочностью. Поэтому разработаны «композитные» мембраны, представляющую собой тонкую селективную пленку (селективный слой), нанесенную на пористую подложку обычно из того же материала. Для нанесения ультратонкого слоя используется метод межфазной полимеризации (поликонденсации).

Мембраны помещают в аппарат, работающий под давлением.

Основными компонентами аппарата являются:

1. Мембрана.
2. Поддерживающий слой (дренаж) для сбора и отвода очищенной воды.
3. Сепаратор-турбулизатор, помещаемый в канал для образования турбулизации потока.
4. Устройства для ввода исходной воды, отвода концентрата и очищенной воды.
5. Напорный корпус.

Аппараты типа *фильтр-пресс* используют плоские листовые мембраны и представляют собой первые конструкции обратноосмотических аппаратов. Сборка фильтр-прессного аппарата состоит из нескольких плоских дренажных

плит, на которые укладываются плоские мембраны, и специальных рамок, помещаемых между дренажными плитами. Рамка, помещенная между двумя мембранами, образует канал. В рамках сделаны отверстия и протоки для распределения исходной воды и сбора фильтрата. Вся конструкция собирается из чередующихся дренажных плит и рамок, которые прижимаются друг к другу с помощью стяжных болтов и фланцевых плит.

В аппаратах круглой формы (дискового типа) стяжной болт располагается в центре круга. Исходная вода движется радиально из центра к периферии круглой камеры, выходя наружу. Вся сборка помещается в напорный корпус цилиндрической формы.

Такие аппараты очень дороги, что ограничивает их применение в основном в системах очистки обратного осмоса малой производительности, а чаще – в системах ультрафильтрации.

Рулонные элементы являются в настоящее время наиболее распространенной конструкцией. За многие годы конструкция многократно совершенствовалась с целью улучшить геометрию каналов и потокораспределение, испытывались новые сепараторы-турбулизаторы, дренажные материалы, клеи и т.д.

Рулонные элементы изготавливаются из плоских мембран, которые оборачиваются вокруг перфорированной трубки для сбора очищенной воды. Мембраны склеиваются в «пакеты», которые приклеиваются одной кромкой к перфорированной фильтратоотводящей трубке и оборачиваются вокруг нее. Каждый пакет состоит из двух листов мембран, между которыми проложена специальная дренажная ткань для сбора и отвода фильтрата, а края пакета проклеены специальными эпоксидным клеем. Клей наносится по краям мембран в процессе закручивания «пакетов» вокруг фильтратоотводящей трубки. Между «пакетами» прокладывается сепараторная сетка, которая обеспечивает прохождение потока исходного раствора между мембранами. Таким образом, канал для прохождения обессоливаемой воды, образуется

сепараторной сеткой, проложенной между двумя мембранами, играющей роль также и турбулизатора потока (рис. 2.32).

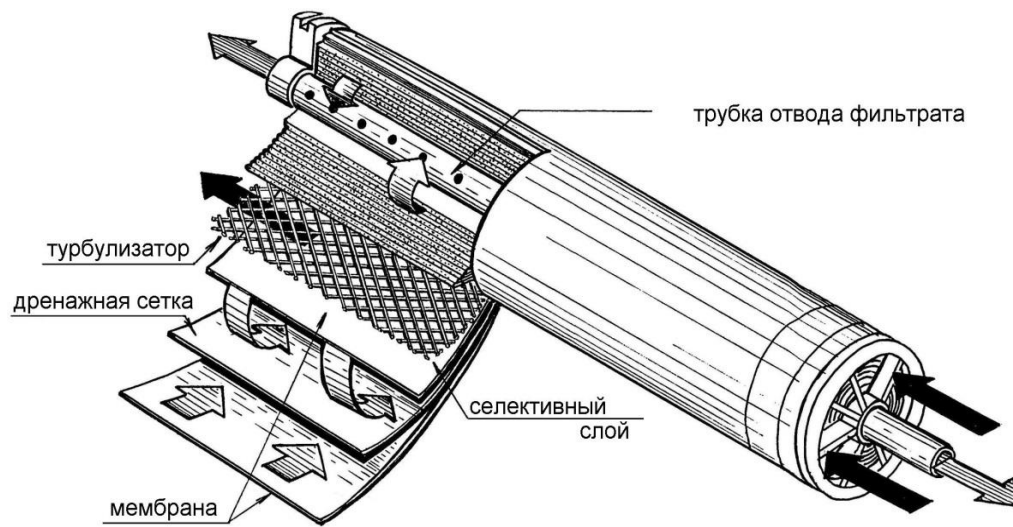


Рис. 2.32. Устройство рулонного фильтрующего элемента.

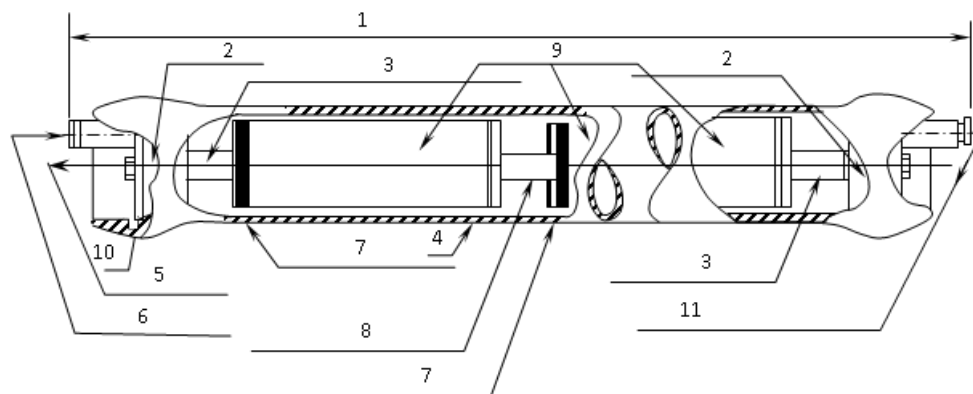


Рис. 2.33. Устройство мембранного аппарата: рулонный элемент, помещенный в корпус.

1 – длина корпуса; 2 – крышка; 3 – адаптер; 4 – корпус; 5 – выход фильтрата; 6 – патрубок подачи исходной воды; 7 – «ласточкин хвост»; 8 – соединительная муфта; 9 – рулонные мембранные элементы; 10 – «канавка» для стопорного кольца; 11 – патрубок выхода концентрата

Обессоленная вода проходит через мембрану внутрь «пакета» и, проходя по дренажному слою, по спирали проходит к центральной фильтратоотводящей трубке, собирается в ней через перфорированные отверстия и выводится из аппарата.

Рулонные элементы помещают в напорные корпуса, от одного до семи элементов друг за другом. Существуют разнообразные конструкции для

крепления элементов в напорном корпусе (рис. 2.33). Каждый отдельный элемент обычно рекомендуется помещать в корпусе установки таким образом, чтобы соотношение количества обессоленной воды, прошедшей через мембраны (фильтрата) и исходной воды, поступающей в аппарат, в единицу времени было 1:10. Это определяется гидродинамическими характеристиками мембран и явлением концентрационной поляризации, уровень который должен быть сведен к минимуму. Поэтому, для того, чтобы в промышленных установках обеспечить соотношение расходов фильтрата и концентрата на уровне 1:1,5 или 1:2, мембранные аппараты komponуются таким образом, что путь воды составляет до 18 м. Такое подключение называется «елочкой», т.к. по мере увеличения расхода фильтрата уменьшается число параллельно работающих аппаратов (рис. 2.34).

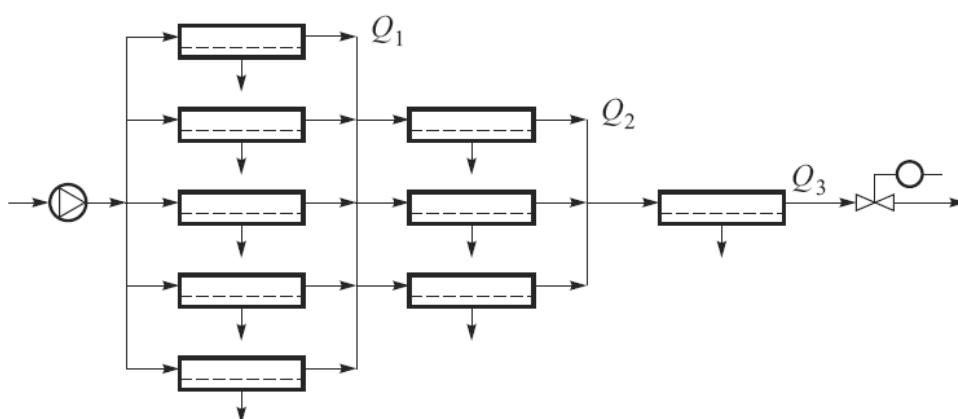


Рис. 2.34. Коническая каскадная односторонняя схема («елочка»).

Рулонные элементы оказались наиболее удобными в эксплуатации. Элементы легко подвергать химической регенерации (промывке), легко производить замену элементов в установке. Конструкции и размеры элементов унифицированы, поэтому возможно покупать элементы одинаковых типоразмеров от различных производителей.

В мембранных аппаратах могут также использоваться мембраны в виде *полых волокон* (трубчатой формы). Волокна изготавливаются с внутренним диаметром от 19 до 70 мкм и наружным от 85 до 160 мкм. Исходная вода

фильтруется снаружи внутрь волокна. Располагают полые волокна в аппарате таким образом, чтобы все они располагались параллельно перфорированной распределительной трубке, проходящей по оси аппарата (рис. 2.35).

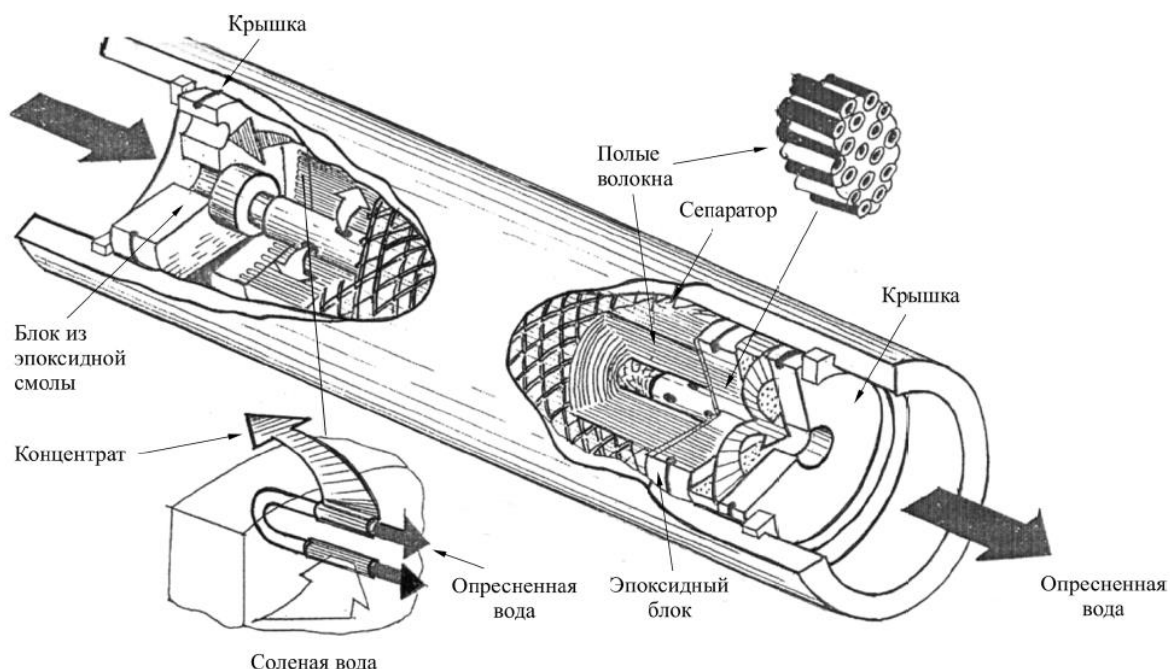


Рис. 2.35. Устройство аппарата с мембранами в виде полого волокна.

Концы волокон с обеих сторон аппарата заключаются в «монолитные блоки» из эпоксидной смолы. С одной стороны бок делают «глухим», с другой стороны волокна проходят «насквозь» через блок. После отверждения блока концы волокон обрезают. Таким образом, фильтрат отводится с торца аппарата.

Исходная вода поступает в перфорированную трубку по оси аппарата и радиально движется от центра к краям аппарата. Концентрат отводится через зазор между «глухим» блоком и корпусом, а фильтрат через торец фильтратоотводящего блока собирается в пористом фильтратосборном блоке и через фильтратоотводящую трубку выводится из аппарата.

Аппарат помещается в напорный трубчатый корпус, с торцов закрытый круглыми крышками с уплотнительными манжетами. Исходная вода, фильтрат и концентрат подаются через специальные патрубки, соединенные с торцевыми крышками.

В последнее время аппараты обратного осмоса с полым волокном полностью вытеснены рулонными элементами. Однако конструкция аппаратов с полыми волокнами большого диаметра (так называемыми капиллярными) в настоящее время широко и успешно применяется в ультрафильтрации благодаря возможности проведения гидравлических промывок.

С первых шагов внедрения мембранных установок обнаружилась проблема образования на мембранах осадков различных веществ, содержащихся в обрабатываемой воде. Поэтому необходимым условием надежной работы любой мембраной установки является тщательная предочистка, позволяющая предотвратить осадкообразование на мембранах.

Основными видами осадков на мембранах являются:

- осадки малорастворимых в воде солей (карбонат кальция, сульфат кальция, силикат кальция);
- осадки взвешенных и коллоидных веществ (гидроокись железа, частицы глины, ила, коллоидная гидроокись алюминия);
- осадки биологического происхождения;
- осадки высокомолекулярных органических веществ (гуминовых и фульвокислот, образующих цветность).

Кроме того, на композитные и полиамидные мембраны разрушительное действие оказывает свободный хлор.

Основной причиной образования осадков малорастворимых солей в аппаратах обратного осмоса является пересыщение раствора, то есть состояние системы, при котором содержание ионов, образующих соль, превышает пределы растворимости. Пересыщение раствора в процессе обратного осмоса возникает в связи с явлением концентрационной поляризации у поверхности мембраны, а также благодаря концентрированию раствора в аппаратах.

В основе механизмов образования коллоидных и органических осадков на мембранах лежат механизмы адгезии частиц к мембране, коагуляции и осаждения.

Осадкообразование на мембранах приводит к уменьшению производительности мембран и потере ее селективных свойств. При образовании на поверхности мембраны осадка толщина пограничного слоя увеличивается на высоту слоя осадка, поэтому перенос соли от поверхности мембраны в ядро потока за счет диффузии в таких условиях значительно затрудняется, по сравнению с режимом без осадка. Уменьшение селективности происходит за счет увеличения концентрации у поверхности мембраны вследствие развития концентрационной поляризации. Увеличение концентрации солей у поверхности мембраны ведет к снижению ее производительности за счет увеличения осмотического давления раствора.

Для удаления загрязнений из воды или предотвращения их образования на мембранах используется ряд технологических процессов и соответствующих аппаратов (сооружений).

При высоких значениях мутности и цветности для эффективного ведения процесса коагуляции используют осветлители с взвешенным осадком. Обязательным требованием предочистки является прохождение уже очищенной воды через патронные фильтры с размером пор 5 микрон для улавливания крупных частиц перед поступлением воды в насосы высокого давления и далее – в мембранные аппараты. Для предварительной очистки поверхностных вод перед подачей на установки обратного осмоса в современных технологических схемах используются системы ультрафильтрации.

Из солей, плохо растворимых в воде, наиболее для мембран опасны (в порядке возрастания): карбонат кальция, сульфат кальция, силикатные осадки, сульфат бария, сульфат стронция, фторид кальция.

Предотвращение образования карбоната кальция на мембранах может достигаться дозированием кислоты в исходную воду или умягчением исходной воды. В настоящее время проблема осадков карбоната и сульфата кальция чаще всего решается с помощью дозирования в исходную воду ингибиторов – присутствие которых в исходной воде замедляет процесс образования

отложений. Ингибиторы дозируются в очень малых количествах – от 3 до 10 мг на 1 литр исходной воды, при этом дают очень высокий эффект замедления образования осадка. При этом срок непрерывной эксплуатации мембранных установок составляет 500 – 2000 часов. По истечении этого срока необходимо провести химическую регенерацию мембран, заключающуюся в растворении отложений специальными растворами. Основные распространенные классы ингибирующих веществ, это полифосфаты, полимеры на основе акриловой кислоты (полиакрилаты), поликарбоксилаты, фосфонаты (полимеры на основе фосфорной кислоты и ее солей). Смеси поликарбоксилатов и фосфонатов, а также сополимеры сульфоновой и акриловой кислоты.

Дизайн установки зависит от ее назначения и заданных параметров: производительности, выхода фильтрата, а так же типа аппаратов, и их конфигурации. Главной частью установки является мембранный модуль, представляющий собой один или несколько (до 7) рулонных элементов, помещенных в напорный корпус. Задача инженера – собрать модули таким образом, чтобы получить оптимальное распределение потоков, соответствующее минимальному гидравлическому сопротивлению и минимальной степени концентрационной поляризации.

Распределение потоков в установке является важным фактором, определяющим надежность последующей эксплуатации. В установках обратного осмоса используются две базовые конфигурации потоков:

- 1) прямоточная система (2.36, а);
- 2) система с рециркуляцией (2.36, б).

В прямоточной системе очищаемая вода проходит через мембранные модули. По мере продвижения воды от входа к выходу из модуля расход транзитного потока концентрата уменьшается. Для того чтобы снизить опасность развития концентрационной поляризации, используется многоступенчатая схема подключения модулей «елочкой» (рис. 2.34). При

такой конфигурации система спроектирована так, чтобы скорость потока в аппаратах была одинаковой.

В случае использования рециркуляционной системы, концентрат с заданным высоким расходом проходит через аппарат, и основная часть концентрата возвращается в голову установки, а часть концентрата идет на сброс. Схема с рециркуляцией обычно используется в небольших установках, состоящих из 1-2-х модулей, где невозможно организовать многоступенчатую прямоточную схему.

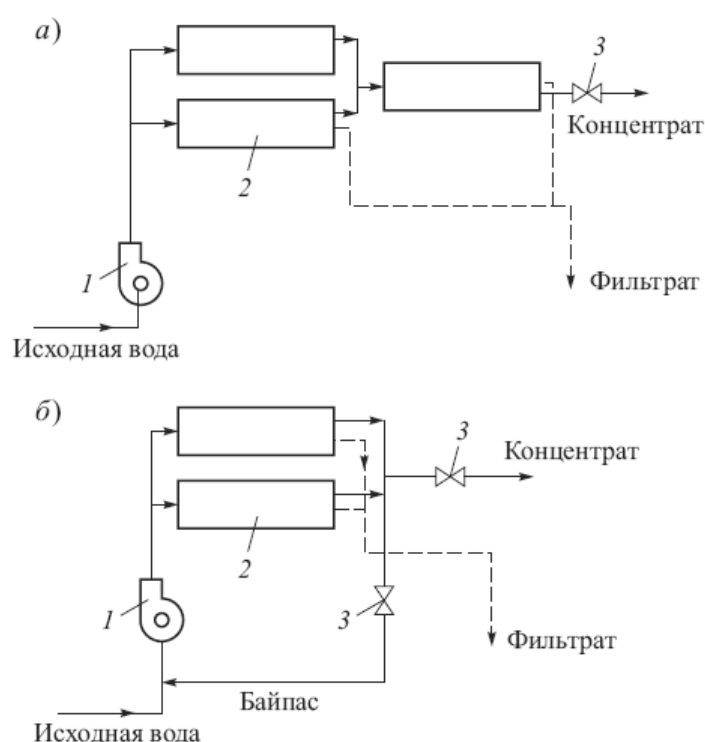


Рис. 2.36. Схемы работы обратноосмотических установок:

а – прямоточная; б – циркуляционная; 1 – насос; 2 – мембранный аппарат; 3 – регулирующий вентиль

Все крупные системы обратного осмоса (25-500 м³/ч) работают в соответствии с «прямоточной» схемой: исходная вода подается рабочим насосом высокого давления в установку, где разделяется на 2 потока – фильтрат и концентрат.

На рис. 2.37 представлена схема обратноосмотической установки, содержащая оборудование для предотвращения осадкообразования на

мембранах (системы дозирования ингибиторов и моющий контур для растворения осадков). На рис. 2.38 показан внешний вид мембранного блока производительностью около 70-100 м³/ч.

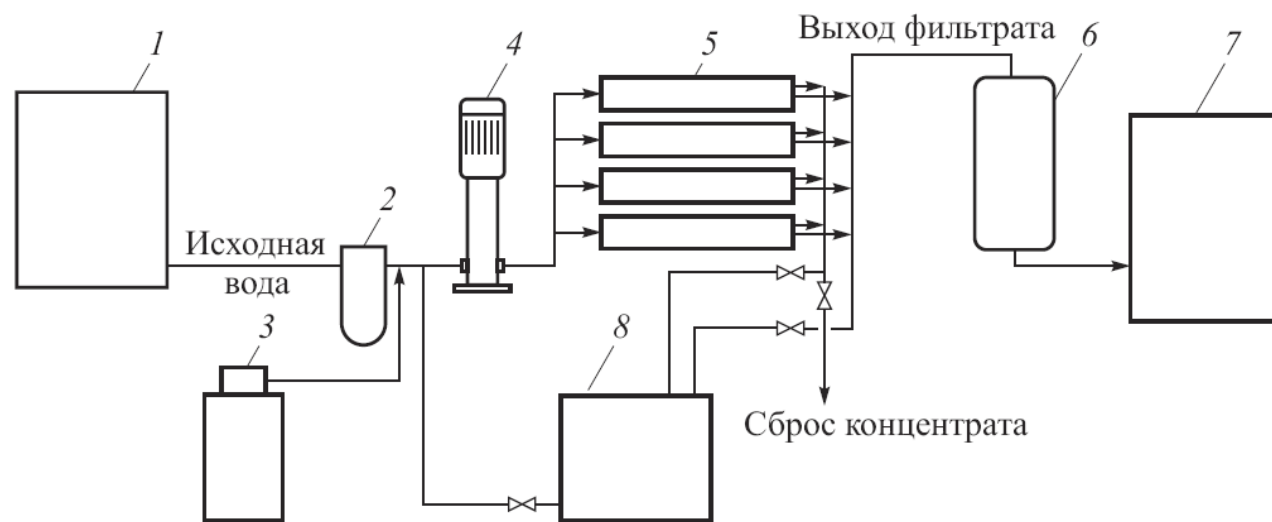


Рис. 2.37. Схема обратноосмотической установки для обессоливания воды:

1 - предочистка; 2 - патронный фильтр 100 мкм; 3 - дозирование ингибитора или кислоты; 4 - центробежный многоступенчатый насос; 5 - мембранный элемент; 6 - ионообменные фильтры доочистки; 7 - бак обессоленной воды; 8 - бак для химической промывки мембран.

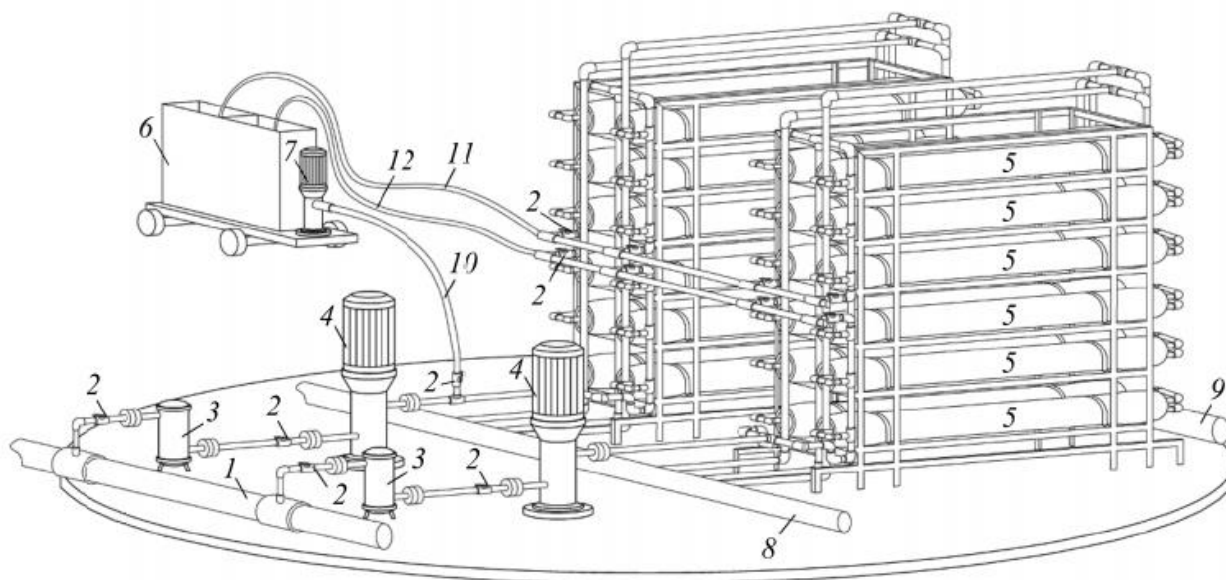


Рис. 2.38. Конструкция мембранной установки:

1 – подводящий трубопровод; 2 – шаровый кран; 3 – патронный фильтр; 4 – насос высокого давления; 5 – мембранный аппарат; 6 – бак промывки; 7 – промывной насос; 8 – трубопровод концентрата; 9 – трубопровод фильтрата; 10, 11, 12 – шланги для проведения промывки

2.6.2. Обессоливание электродиализом и электродеионизацией

Электродиализ (ЭД) – метод электрохимического опреснения и обессоливания воды, движущей силой которого является электрический перенос ионов. Это хорошо промышленно развитый и изученный в отечественной практике метод для применения в опреснении подземных вод, получивший наибольшее развитие в нашей стране в 1960-80-х гг.

Количество получаемой опресненной воды, а также удаленной из воды соли пропорционально энергозатратам, поэтому энергопотребление – важный фактор, определяющий стоимость процесса.

Оптимальным принято считать применение электродиализа для опреснения подземных вод соледержащих от 500 до 10000 мг/л. Именно в этом диапазоне соледержаний он является конкурентоспособным с другими методами – обратным осмосом и дистилляцией.

Энергетические затраты на перенос ионов определяются законом Фарадея и составляют намного меньшие величины, чем затраты на изменение агрегатного состояния вещества, как в случае выпарки (дистилляции). Поэтому метод электродиализа считался в 1970-80-х гг. прошлого века особенно перспективным для применения в схемах опреснения и обессоливания воды, и даже в системах химводоочистки ТЭЦ. Однако появление и развитие метода обратного осмоса – более простого и экономически выгодного, практически вытеснило электродиализ из схем водоподготовки. И всё же в отечественной и мировой практике ЭД продолжает использоваться при подготовке (опреснении) воды с невысокими значениями соледержания (1-2 г/л) благодаря низким эксплуатационным затратам, надежности и простоте технологии.

В настоящее время большие перспективы приобретает новый электрохимический процесс – электродеионизация, или видоизмененный электродиализ. Камеры электродиализных аппаратов заполняются ионообменными смолами, регенерация которых происходит за счет электрического переноса ионов в электрическое поле. Такой процесс позволяет

получать сверхчистую воду, не используя ионитные фильтры смешанного действия (ФСД) и не тратя кислоту и щелочь на их регенерацию.

Принцип процесса электродиализа показан на рис. 2.39. Между катодом и анодом погруженными в водной раствор помещаются катионообменные и анионообменные мембраны. При наложении разности потенциалов, положительно заряженные ионы начинают двигаться к катоду, а отрицательно заряженные – к аноду. При этом катионы не могут проходить через положительно заряженную мембрану, а анионы – проходят свободно. Аналогично, анионы задерживаются отрицательно заряженной мембраной, а катионы проходят через нее. Таким образом, в камерах, образованных отрицательно и положительно заряженными мембранами, раствор концентрируется, а в смежных камерах раствор разбавляется (обессоливается).

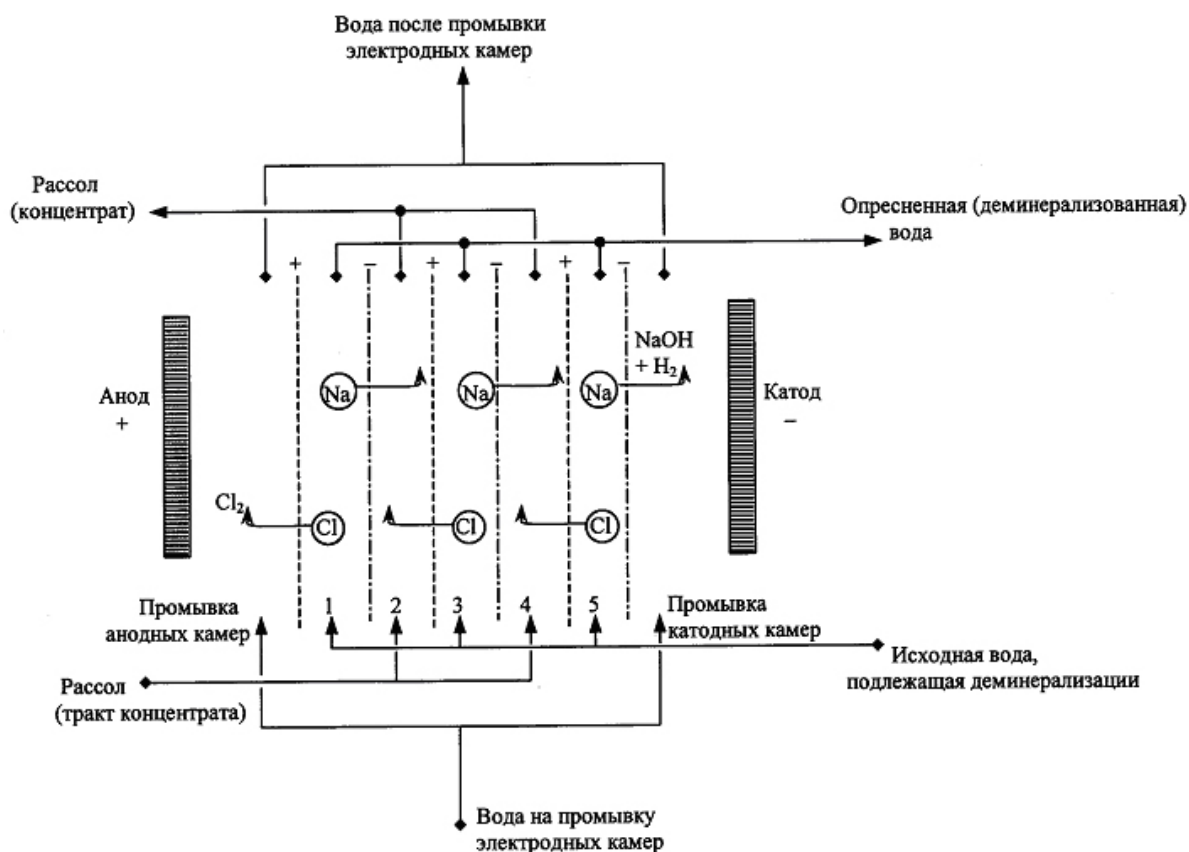


Рис. 2.39. Принцип работы электродиализной установки.

В приэлектродных камерах осуществляется электролиз. При этом на отрицательно заряженном катоде выделяется водород (H₂) и гидроксил – ионы

(OH⁻), а на положительно заряженном аноде выделяются хлор (Cl₂), кислород (O₂), в соответствии с реакциями:



Сила тока, переносимого через камеры электродиализного аппарата, определяется выражением:

$$I = Z \cdot F \cdot Q \cdot \Delta C / e, \quad (2.33)$$

где Z – валентность иона; F – число Фарадея (количество электричества, необходимое для переноса 1 г-эквивалента солей, равное 96500 кулонов); Q – скорость потока; ΔC – разность концентраций исходной и обессоленной воды; E – эффективность.

Сила тока связана с разностью потенциалов E в соответствии с законом Ома:

$$E = I \cdot R, \quad (2.34)$$

где R – общее сопротивление мембранной камеры, равное сопротивлению одной ячейки $R_{\text{я}}$ умноженному на число таких ячеек N :

$$R = R_{\text{я}} \cdot N, \quad (2.35)$$

В свою очередь сопротивление одной ячейки представляет собой сумму сопротивлений:

$$R_{\text{я}} = R_{\text{А}} + R_{\text{д}} + R_{\text{к}} + R_{\text{р}}, \quad (2.36)$$

где $R_{\text{А}}$ – сопротивление анионообменной мембраны; $R_{\text{д}}$ – сопротивления диализатной камеры; $R_{\text{к}}$ – сопротивление катионообменной мембраны; $R_{\text{р}}$ – сопротивление рассольной камеры.

Разность потенциалов, которая должна быть приложена к электродам для осуществления процесса, определяется общим сопротивлением мембранной ванны и величиной плотности тока. Увеличение плотности тока приводит к

увеличению числа перенесенных ионов. Однако плотность тока нельзя увеличивать.

Главным недостатком процесса электродиализа является концентрационная поляризация, или «жесткая» поляризация, которая ограничивает величину плотности тока через мембраны и, соответственно, скорость переноса солей через мембрану.

Причиной явления «жесткой» поляризации при электродиализе является различие в скоростях переноса ионов через мембрану и через раствор.

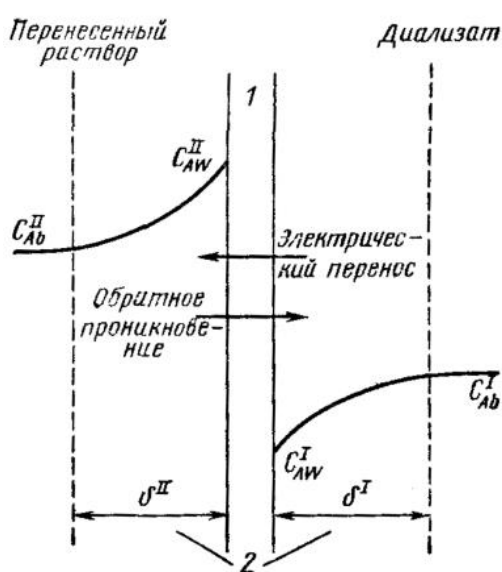


Рис. 2.40. Концентрационная поляризация в электродиализе: 1 – мембрана; 2 – граничный слой.

На рис. 2.40 показан «профиль» концентрационной поляризации. При наличии напряжения на электродах положительно заряженные ионы (катионы) движутся слева направо в направлении катода. Так как перенос через мембрану происходит быстрее (сопротивление мембраны значительно ниже сопротивления водного раствора), чем внутри пограничного слоя в растворе, то концентрация катионов на входе в мембрану снижается, в то время как на выходе из мембраны в примембранном слое будет наблюдаться повышение концентрации. Вследствие установления в примембранном слое градиента концентраций возникает диффузный поток. При достижении стационарного

состояния устанавливается определенный концентрационный профиль (рис. 2.40).

Поток катионов через мембрану, вызванный разностью электрических потенциалов, определяется уравнением:

$$J_m = \frac{t_m I}{zF}, \quad (2.37)$$

где t_m – число переноса ионов в мембране; I – сила тока.

Поток катионов внутри пограничного слоя, вызываемый разностью потенциалов, описывается как:

$$J_n = \frac{t_n \cdot I}{z \cdot F}, \quad (2.38)$$

где t_n – число переноса внутри пограничного слоя раствора.

Пограничный слой у поверхности мембраны со стороны диализатной камеры оказывается обедненным ионами и имеет высокое омическое сопротивление. Вследствие этого возрастает электрическое сопротивление, растут затраты на электроэнергию: часть электрической энергии может рассеивать в виде тепла.

При увеличении разности потенциалов плотность тока будет увеличиваться и, как следствие, концентрация катионов в при мембранном слое будет уменьшаться. По мере приближения значения концентрации катионов у поверхности мембраны к нулю достигается предельная плотность тока $I_{\text{пред}}$.

Дальнейшее увеличение разности потенциалов на электродах не будет приводить к увеличению потока катионов. Для уменьшения эффекта поляризации необходимо уменьшить толщину пограничного слоя, в связи с этим особую важность приобретают конструкции и геометрия каналов, типы сепараторов – турбулизаторов, гидродинамические условия.

В процессе электродиализа перенос ионов осуществляется при протекании через камеры аппаратов постоянного электрического тока при подведении разности потенциалов на электродах.

Для того чтобы осуществить разделение раствора (опреснить воду), используют ионообменные мембраны, селективные по отношению к различным ионам, осуществляющие перенос либо катионов, либо анионов.

К ионообменным мембранам предъявляются два главных требования: высокая электропроводность и высокая селективность — высокая проницаемость для одних ионов и высокое диффузионное сопротивление для ионов с противоположным знаком заряда.

Кроме того, мембраны должны обладать высокой механической прочностью, небольшой степенью набухания.

Селективность ионитовых мембран — способность пропускать ионы с зарядом одного знака, обусловлена наличием в их полимерной матрице фиксированных ионогенных групп имеются электрический заряд. Электрическое поле, создаваемое ионогенными группами, препятствуют прохождению через мембрану ионов с зарядом того же знака, что и заряд ионогенной группы. Например, анионообменные мембраны несут положительно заряженные группы, потому катионы отталкиваются от мембраны. С другой стороны, катионообменные мембраны содержат отрицательно заряженные группы, в этом случае мембраной отталкиваются отрицательно заряженные анионы.

Ионитовые мембраны изготавливаются из ионообменных смол — ионитов, представляющих собой нерастворимые в воде органические высокомолекулярные кислоты (катиониты) или основания (аниониты), активные группы которых способны к ионному обмену в растворах.

В результате сополимеризации стирола и дивинилбензола возникает сшитый сополимер, в который можно ввести либо катионо-обменные (например, амино-группы), либо анионообменные группы (сульфо- или карбоксильные группы).

Благодаря наличию ионных групп полимер «набухает» в воде, при этом мембраны изменяют линейные размеры, чтобы предотвратить значительное набухание, необходима «сшивка» полимера.

Перенос электричества в мембранах происходит из раствора в мембрану и из мембраны в раствор с противоположной стороны. Перенос ионов в ионите происходит за счет подвижных противоионов, поэтому, чем выше удельная обменная способность ионита, тем выше его электропроводность.

Способность ионитовой мембраны проводить электрический ток характеризуется ее удельной электропроводностью, представляющей собой электропроводность мембраны площадью 1 см^2 и толщиной 1 см . Иногда для характеристики электропроводимости мембраны употребляют величину ее поверхностной электропроводности, т.е. электропроводности мембраны площадью 1 см^2 и толщиной, равный фактической толщине данной мембраны. Удельная электропроводность имеет размерность $\text{Ом}^{-1} \times \text{см}^{-1}$, поверхностная электропроводность – $\text{Ом}^{-1} \times \text{см}^{-2}$. Идеально селективная мембрана будет характеризоваться числом переноса $1,0$.

Существуют два различных типа ионообменных мембран – гетерогенные и гомогенные.

Гетерогенные мембраны получают путем смешения тонко измельченного ионита с пленкообразующим связующим (полиэтилен, полипропилен, полистирол, поливинилхлорид). Получение пленок или листовых мембран осуществляется методом каландрирования или сухого формования. Часто листы мембран «армируют» путем запрессовывания в них сеток из шелка или стойкого в кислотах и щелочах искусственного волокна. Эти мембраны обладают относительно невысокой электропроводностью и селективностью. С целью увеличения электропроводности гетерогенных мембран и повышения их селективности катионитовые мембраны подвергают обработке сульфидирующими агентами. Для превращения поверхностных слоев инертного связующего в сульфокатионит, анионитовые мембраны подвергают нитрованию путем введения аминогрупп с последующим их окислением.

Гомогенные мембраны получают путем введения ионных групп в полимерную пленку двумя методами:

1) сополимеризацией имеющего активные группы мономера со «сшивающим» агентом, например, сополимеризацией пропилстиролсульфоната с дивинилбензолом.

2) Получением пленки сополимера с введением в готовую пленку активных групп, например сульфированием стиролдивинилбензольной пленки.

Электропроводность ионитовых мембран возрастает с увеличением их удельной обменной способности.

При проектировании электродиализных установок характеристики ионитовых мембран предоставляются заводом-изготовителем (табл. 2.8).

Таблица 2.8

Технологические характеристики ионитовых мембран

Мембраны	Толщина, мм	Обменная способность в мг-экв/г	Удельное поверхностное сопротивление в 0,1 Н раствора NaCl	Число переноса в 0,1 Н раствора NaCl
1. <u>Катионитовые</u>				
Гетерогенные:				
МК-40 Щекинского химкомбината	0,7	2,3	30	0,93
Гомогенные:				
Анкалит К-2	0,6 – 0,7	2	8 – 10	0,95
МК-100	0,3	2,8	2,5 – 5	0,97
РМК-100	0,3	1,88	6,3	0,96
2. <u>Анионитовые</u>				
Гетерогенные:				
МА-40 Щекинского	0,7	3	35	0,93

химкомбината				
Гомогенные:				
Анкалит А-4	0,6	3,5	8 – 15	0,93
МА-41	0,6	2,5	9 – 12	0,93
МА-100	0,3	2,3	5 – 6	0,97

Примечания: 1. Мембранный потенциал для ионитовых мембран равен 0,05 Н при концентрациях растворов NaCl 0,1 Н с одной стороны мембраны и 0,01 Н с другой.

2. Перенос воды составляет 0,01 – 0,3 мл/см²·при плотности тока 0,01 А/см².

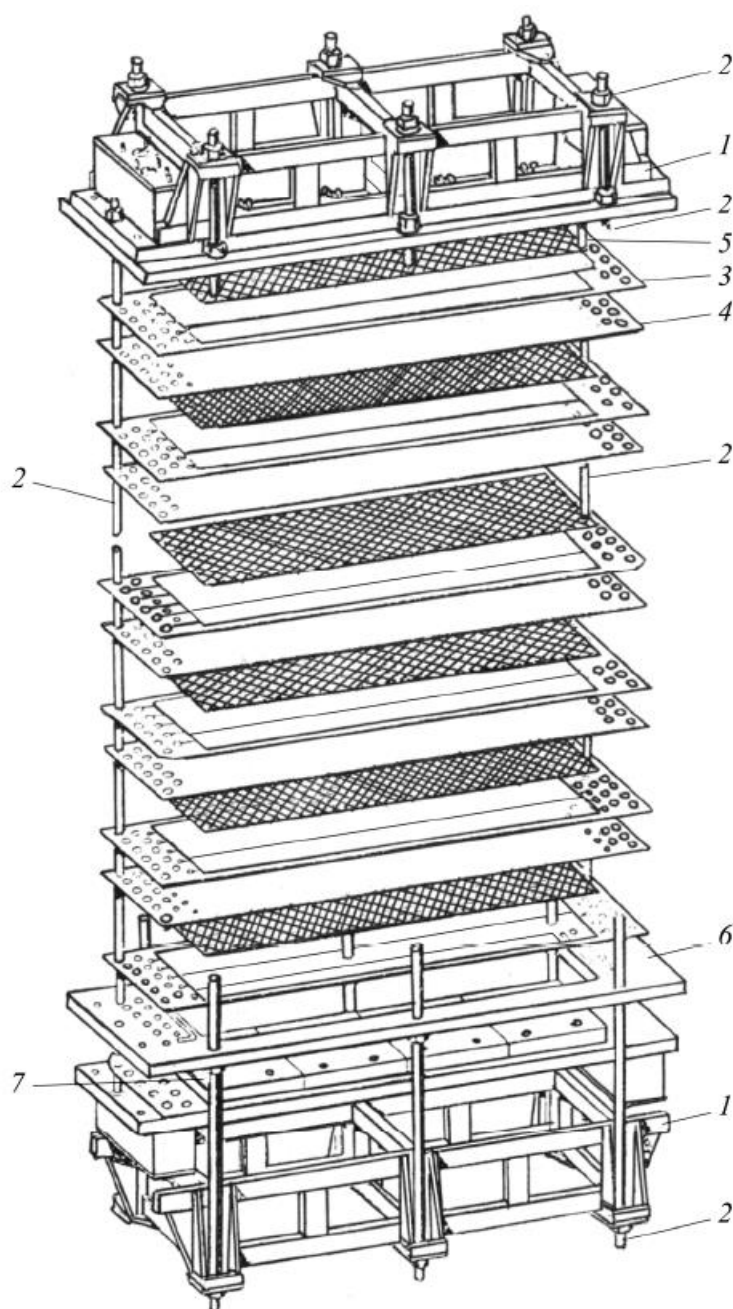


Рис. 2.41. Устройство электродиализного аппарата типа фильтр-пресс:

1 – нажимные плиты; 2 – стяжные болты; 3 – рамки; 4 – мембраны; 5 – сепараторная сетка; 6 – электродная камера; 7 – электроды.

В настоящее время в практике опреснения воды методом электродиализа применяются аппараты конструкции фильтр-пресс. Они представляют собой сборку из чередующихся камер дилюата и рассола, разделенных катионитовыми и анионитовыми мембранами, между которыми находятся рамки из диэлектрика. Толщина рамки определяет толщину камеры.

Каналы для подвода и отвода воды в камерах образованы с помощью отверстий в рамках.

Анод и катод в аппарате укрепляются в торцевых плитах. Через отверстия в плитах «пропущены» стяжные болты, с помощью которых происходит снятие конструкций. Уплотнение всей сборки происходит по площади соприкосновения поверхностей рамок и мембраны (рис. 2.41).

Вся сборка находится в электрическом поле постоянного тока между парой электродов, расположенных по торцам аппарата.

Под действием электрического поля происходит направленное движение ионов солей. При этом катионы, двигаясь к катоду, проходят через катионитовые мембраны и задерживаются анионитовыми мембранами. Аналогичный процесс происходит с анионами.

В результате в камерах дилюата концентрации ионов уменьшается (происходит опреснение воды), а в камерах рассола концентрации ионов возрастают.

В камерах, смежных с электродами, протекают электродные процессы с выделением газов (кислорода, водорода).

Рамки электродиализных аппаратов изготавливают из полиэтилена, поливинилхлорида или других неэлектропроводимых материалов.

Рамки прокладочного типа образуют внешние стенки камеры (рис. 2.41). Между мембранами во избежание их соприкосновения помещаются прокладки, вкладываемые в рамку. Эти прокладки представляют собой сетки

пространственного плетения. Сетки изготавливают из поливинилхлорида, полиэтилена и других материалов – диэлектриков. Конфигурация плетения сетки должна быть такова, чтобы она могла поддерживать мембраны и хорошо турбулизировать поток жидкости при минимальном экранировании поверхности мембран. Поэтому прокладки в рамках называют «сепараторами – турбулизаторами».

Учитывая трудности сборки аппаратов с большим количеством рабочих ячеек, их количество обычно не превышает 150 – 250 штук.

Электродиализные аппараты подразделяются на горизонтальные и вертикальные в зависимости от направления электрического поля.

Существенным достоинством аппаратов с горизонтальным направлением электрического тока является беспрепятственное удаление газов из рабочих камер за счет всплывания пузырьков и уноса в восходящем потоке.

Катоды и аноды опреснительных аппаратов изготавливаются из стойких к окислению сильными окислителями материалов. Из известных материалов достаточной устойчивостью обладают платина, магнетит и графиты высокой плотности. Также применяются электроды из платинированного титана с толщиной платинового покрытия 1-3 микрона.

Процесс опреснения воды методом электродиализа может быть осуществлен по одной из рассмотренных ниже схем (рис. 2.42).

а) Прямоточная.

В прямоточных опреснительных установках солесодержание опресненной воды снижается от исходного до заданного за один проход воды через установку (рис. 2.42, а).

Дилуат и рассол проходят параллельными потоками через один или несколько последовательно установленных аппаратов (ступеней). Эта схема, как правило, применяется в тех случаях, когда расходы дилуата и рассола равны (при кратности концентрирования $K = 2$).

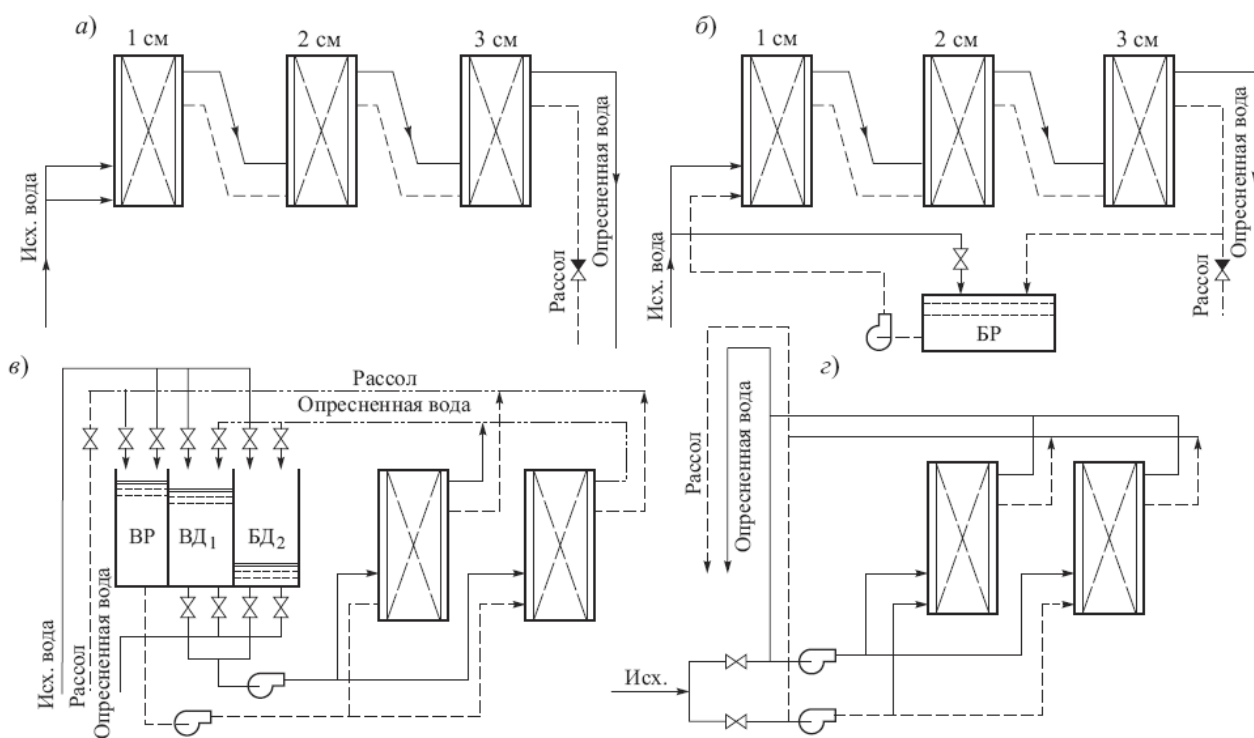


Рис. 2.42. Схемы электродиализных опреснительных установок:

а) прямоточная; б) прямоточная с рециркуляцией рассола; в) циркуляционно-порционная схема; г) циркуляционная схема непрерывного действия.

б) Прямоточная схема с рециркуляцией рассола.

В таких установках диализат и рассол проходят параллельными потоками через несколько последовательно установленных аппаратов (ступеней) с равными расходами (рис. 2.42, б). Для поддержания оптимальной концентрации рассола осуществляется его рециркуляция. Эта схема рекомендуется для крупных опреснительных установок. В каждой из ступеней опреснения может быть установлено по несколько параллельных аппаратов.

в) Циркуляционно-порционная схема.

Диализат и рассол прокачиваются циркуляционными насосами через один или несколько параллельно установленных аппаратов с возвратом в циркуляционные емкости. Работа установки осуществляется до тех пор, пока солесодержание диализата не снизится до заданной величины. Затем опресненная вода выдается потребителю, а циркуляционный насос диализата переключается на вторую емкость, предварительно заполненную исходной водой (рис. 2.42, в).

Концентрация рассола в циркуляционной емкости определяется величиной допустимой кратности концентрирования исходной воды и поддерживается на постоянном уровне за счет непрерывной продувки и восполнения его убыли в емкости рассола исходной водой.

г) Циркуляционная схема непрерывного действия

Эта схема аналогична предыдущей, однако в ней отсутствуют циркуляционные емкости, а исходная вода подается непосредственно во всасывающие линии циркуляционных насосов дилуата и рассола. В дилуатном тракте исходная вода разбавляется частью опресненной воды, вытесняя остальную часть потребителю. В рассольном тракте исходная вода разбавляет циркулирующий рассол до концентрации, определяемой величиной допустимой кратности концентрирования, и вытеснят часть концентрированного рассола, идущего на сброс (рис. 2.42, г).

К числу достоинств циркуляционных схем следует отнести:

- возможность использования при любом солесодержании исходной воды одного аппарата.
- простота регулирования глубины опреснения.

К числу недостатков можно отнести большие затраты энергии, необходимость в циркулирующих емкостях и дополнительном оборудовании.

Электродеионизация – процесс, совмещающий в себе преимущества электродиализа и ионного обмена. Этот процесс разработан для проведения глубокого обессоливания воды и использования как альтернативы ионообменным фильтрам смешанного действия.

Сущность процесса заключается в том, что ионообменную смолу помещают в камеры электродиализного аппарата, для увеличения глубины обессоливания. Как уже говорилось выше, основной недостаток электродиализного процесса заключается в трудности достижения глубокой степени обессоливания воды, что объясняется явлением «жесткой» поляризации. В дилуатных камерах электродиализной ячейки при низких

концентрациях ионов солей прекращается перенос заряда, и достигнуть меньшей концентрации солей практически невозможно. Однако, если в дилуатные камеры поместить зерна катионита и анионита (рис. 2.43), катионы и анионы солей будут обмениваться на ионы H^+ и OH^- , при этом катионы и анионы переходят в иониты, а ток переносится ионами H^+ и OH^- .

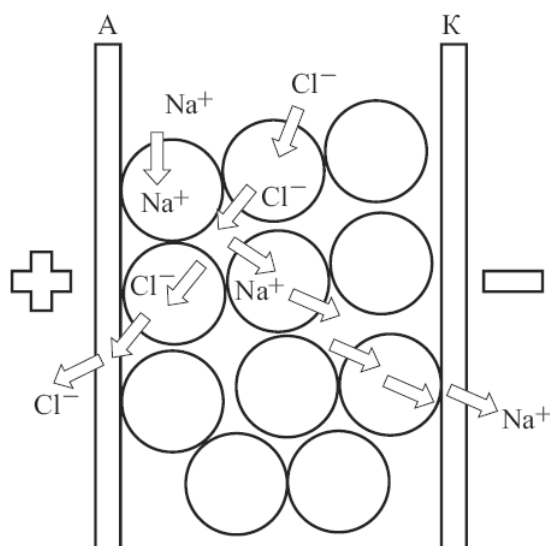


Рис. 2.43. Движение ионов в камере между заряженными ионоселективными мембранами при помещении в раствор зерен ионитов

При этом в электрическом поле происходит диссоциация молекул воды на ионы H^+ и OH^- . Присутствие в воде этих ионов вызывает обмен ионов H^+ на катионы Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , и OH^- на анионы Cl^- и SO_4^{2-} . Переходящие в раствор ионы солей, двигаясь в электрическом поле, переходят в камеры рассола, как в случае «классического» электродиализа (рис. 2.44, а).

Таким образом, при электродеионизации эффект обессоливания достигается благодаря ионному обмену, происходящему в камерах электродиализного аппарата. Благодаря процессу электродиализа происходит эффект регенерации ионитов образующимися за счет диссоциации воды ионами H^+ и OH^- (рис. 2.44, б).

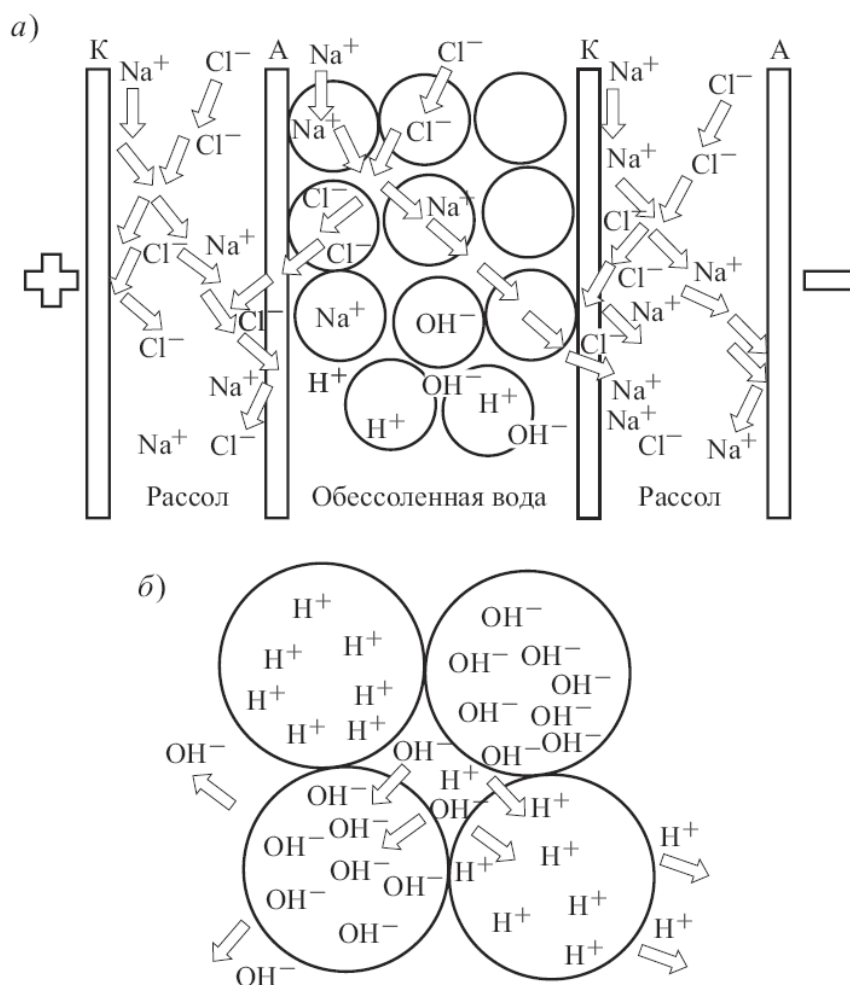


Рис. 2.44. Схема процесса деионизации и регенерации ионитов в диализатных камерах электродиализной ячейки (а) и непрерывная регенерация зерен катионита и анионита ионами H^+ и OH^- (б).

Диссоциация воды происходит при недостатке ионов в растворе (при низкой концентрации ионов солей в дилуате). Из-за недостатка ионов солей переносящих заряд, ток переносится ионами H^+ и OH^- , что вызывает дополнительную диссоциацию молекул воды.

В электродеионизационной ячейке при ее работе создается 2 зоны, расположенные по ходу движения воды в камере: зона усиленного переноса (транспорта) и зона режима электрорегенерации.

Сильно-диссоциированные ионы (Ca^{2+} , SO_4^{2-}) удаляются в первую очередь (зона усиленного переноса), слабо-диссоциированные ионы (SiO_3^{2-} , BO_3^{3-}) удаляются по мере прохождения воды через канал камеры во второй зоне, где происходит также режим регенерации – перенос ионов H^+ и OH^- (рис. 2.44).

При получении сверхчистой воды, необходимая сила тока определяется по формуле:

$$I = \frac{Q(C_{нач} - C_{кон})F}{\eta}, \quad (2.39)$$

где F – число Фарадея; η – выход по току.

Величина выхода по току определяется как отношение теоретически полученного значения силы тока I , необходимой для обессоливания, и фактического значения силы тока I_a .

$$\eta = \frac{I}{I_a} \cdot 100, \%. \quad (2.40)$$

При глубоком обессоливании в аппаратах электродеионизации ток переносится с помощью ионов солей, содержащихся в воде, и ионов H^+ и OH^- , образующихся при диссоциации воды. Ионы H^+ и OH^- , переносимые под действием приложенного напряжения, вызывают электрохимическую регенерацию смолы. Таким образом, электроэнергия лишь частично используется на перенос солей (обессоливание воды), а в основном – на перенос ионов H^+ и OH^- . Например, при величине выхода по току 25% и при силе постоянного тока 4А, только 1 ампер переносит ионы солей, а 3 ампера расходуются на перенос ионов H^+ и OH^- . Обратная диффузия ионов (в противоположном переносу тока направлении) также вызывает снижение эффективности процесса. Для того, чтобы производить воду с электросопротивлением выше одного мегома, необходимо, учитывая значение коэффициента солеъема аппарата, подавать в аппарат воду с низким солесодержанием (менее 0,005 мг-экв/л) и проводить процесс при величине выхода по току менее 35%. В некоторых случаях, при необходимости удаления труднодиссоциированных ионов (силикатов и бора), используются значения величины выхода по току 5% и менее.

Производителями оборудования для электродеионизации используется параметр Е-фактор (EF). Эта величина представляет собой отношение приложенной силы тока и теоретически рассчитанной величины силы тока:

$$EF = I_a / I. \quad (2.41)$$

Эта величина, обратная величине выхода по току, показывающая, во сколько раз приложенная сила тока должна быть выше теоретически определенной величины.

Изготовители оборудования ограничивают величину приложенного напряжения значением 600V, чтобы избежать затрат на дорогостоящие системы электропитания. При этом величина силы тока зависит от электрического сопротивления. Поскольку эффективность работы системы деионизации (расход воды, который можно обессолить или глубина деионизации, который можно добиться для заданного расхода) зависит от величины силы тока, важно уметь определять оптимальные параметры процесса, в частности, подбирать наименьшую величину сопротивления ячеек.

Для определения величины омического сопротивления электродиализной ячейки, необходимо провести расчет выхода по току:

$$\eta = \frac{3,22 \cdot C \cdot Q}{n \cdot I_a}, \quad (2.42)$$

где C – общее солесодержание, мг/л; n – количество ячеек в аппарате; Q – расход воды м³/ч.

В представленной формуле солесодержание C учитывается только легко переносимые ионообменным материалом сильнодиссоциированные ионы. Для учета слабодиссоциированных ионов (силикатов и бора) используется параметр FCE (Feed Conductivity Equivalent). Формула определения выхода по току с учетом FCE выглядит следующим образом:

$$\eta = \frac{1,31 \cdot FCE \cdot Q}{n \cdot I_a}. \quad (2.43)$$

Все расчеты процесса деионизации проводятся аналогично расчетам процесса электродиализа.

Подбор аппаратов для электродеионизации производится на основе их параметров: расход, величина селективности (солесъема) и т.д. Простота подбора определяется тем, что требования к исходной воде ограничиваются

величиной 10-30 мг/л, т.е. аппараты уже рассчитаны для проведения процесса. Общий вид и габариты стандартного аппарата деионизации производительностью 25-30 м³/ч показаны на рис. 2.45, а внешний вид и габариты станции электродеионизации производительностью 200 м³/ч показаны на рис. 2.46.

Для определения соотношения потоков фильтрата и концентрата (диализата и рассола) используется параметр выхода фильтрата R (recovery), определяемый как:

$$R = Q_{\text{ф}}/Q_{\text{к}}, \quad (2.44)$$

где $Q_{\text{ф}}$ – расход фильтрата, м³/ч; $Q_{\text{к}}$ – расход концентрата, м³/ч.

Электросопротивление аппаратов деионизации складывается из:

- удельного поверхностного сопротивления мембран (катионообменных и анионообменных);
- сопротивления ионообменного материала в камерах;
- удельных электропроводностей растворов в дилуатных и рассольных камерах;
- сопротивления катодных и анодных камер.

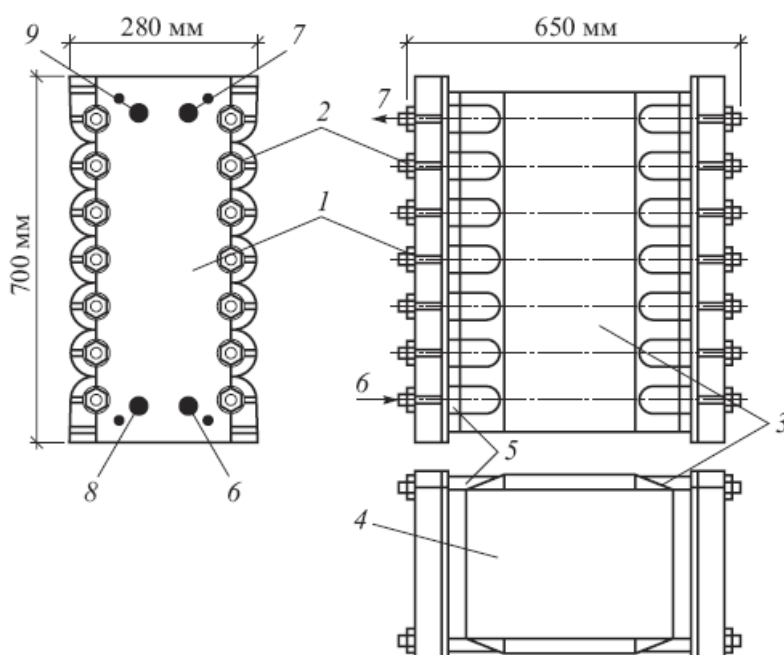


Рис. 2.45. Внешний вид и габаритные размеры аппарата электродеионизации производительностью 25-30 м³/ч:

1 – стяжные болты; 2 – гайки; 3 – ячейки; 4 – боковая накладка; 5 – накладки на болты; 6 – подача исходной воды; 7 – вход дилуата; 8 – вход концентрата; 9 – выход концентрата

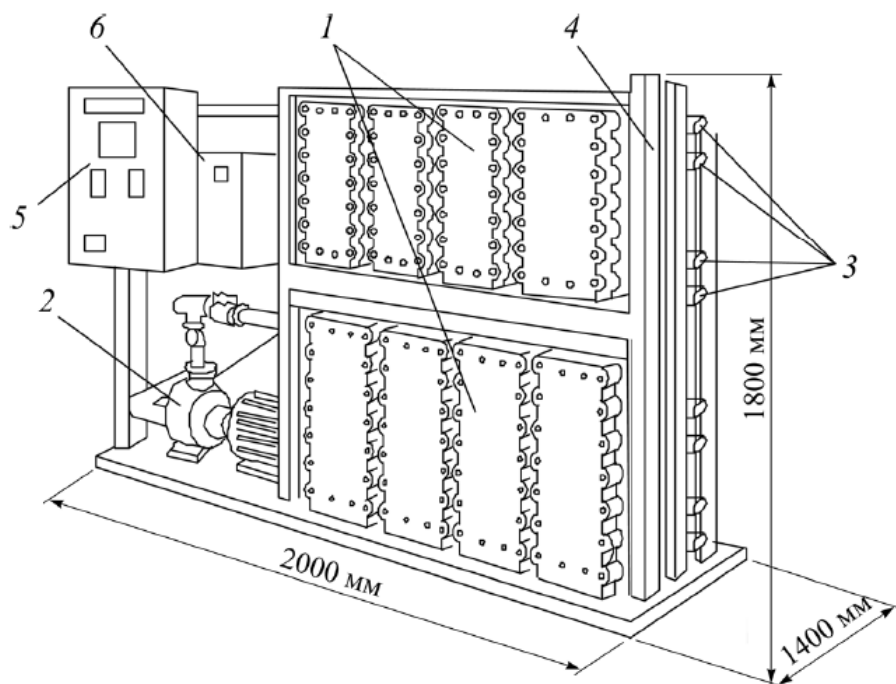


Рис. 2.46. Внешний вид и габариты станции электродеионизации:

1 – аппараты; 2 – циркуляционный насос; 3 – трубопроводы распределительной системы; 4 – рама; 5 – шкаф управления; 6 – тиристорный преобразователь

Кроме того, сопротивление аппаратов деионизации зависит от температуры.

Для уменьшения сопротивления аппаратов используют различные методы:

1. Увеличение солесодержания рассольных камер с помощью рециркуляции концентрат;

2. Увеличение солесодержания концентрата с помощью его «подсаливания», добавления раствора NaCl путем его постоянного дозирования. Главными недостатками этой технологии является наличие сбросного потока концентрата и образования хлора в анодных камерах.

3. Наполнение ионообменной смолой рассольных камер. Это уменьшает обратную диффузию ионов, улучшает солесъем, улучшает отвод ионов с поверхности мембран. Сила тока определяется из выражения:

$$I = \frac{U - (U_{\text{э}} + nE_{\text{м}})}{n \cdot r_{\text{я}}}, \quad (2.45)$$

где n – количество ячеек; $r_{\text{я}}$ – электросопротивления одной ячейки.

Плотность тока, расходуемого на перенос ионов, зависит от величины выхода по току. Выход по току может быть определен по формуле:

$$\eta = \frac{Q(C_{\text{нач}} - C_{\text{кон}})F}{I_a}. \quad (2.46)$$

Процесс электродеионизации специально разработан для получения глубоко деионизованной воды в схемах обессоливания вместо ионообменных фильтров смешанного действия. Основным преимуществом в применении аппаратов электродеионизации является отсутствие применения реагентов (кислот и щелочей) для регенерации ионообменных фильтров. Поэтому процесс электродеионизации является «экологически чистым» методом, не имеющим солевых сбросов.

3. ДЕГАЗАЦИЯ И УДАЛЕНИЕ КРЕМНИЕВОЙ КИСЛОТЫ. ОБРАБОТКА И ОХЛАЖДЕНИЕ ОБОРОТНОЙ ВОДЫ

3.1. Дегазация воды

3.1.1. Теоретические основы процесса

Совокупность мероприятий по удалению из воды растворенных в ней или образующихся в процессе ее обработки газов называют дегазацией. Обычно из воды приходится удалять кислород, уголекислоту, сероводород, метан и др. (последние два газа при обработке подземных вод). Кислород, уголекислота и сероводород вызывают, либо катализируют процесс коррозии металла. Уголекислый газ кроме того вызывает разрушение бетона. При обессоливании воды приходится решать задачу удаления уголекислоты, которая образуется при взаимодействии бикарбонат-иона с ионом водорода.

Существующие методы дегазации воды подразделяют на физические и химические. При использовании физических методов вода, содержащая удаляемый газ, приводится в соприкосновение с воздухом, если парциальное давление этого газа в воздухе близко к нулю или же создаются условия, при которых растворимость газа в воде становится ничтожно малой.

С помощью первого приема, т.е. аэрации воды, обычно удаляют свободную уголекислоту и сероводород, поскольку парциальное давление этих газов в атмосферном воздухе близко к нулю. Ко второму приему обычно прибегают при обескислороживании воды. В этом случае ввиду значительного парциального давления кислорода в атмосферном воздухе аэрацией воды кислород удалить нельзя, поэтому воду доводят до кипения, тогда растворимость всех газов в ней падает до нуля. Для этого применяют либо нагревание воды (в термических деаэраторах), либо понижение давления до величины, при которой вода кипит без дополнительного подогрева в вакуумных дегазаторах.

В настоящее время наиболее распространенной теорией, объясняющей механизм передачи вещества между жидкой и газообразной фазами в процессе десорбции, является теория двухслойного поглощения, согласно которой десорбция сводится к последовательной диффузии удаляемого газа через два пограничных слоя – жидкостный и газовый. При диффузии газа из жидкой фазы в газообразную концентрация его и парциальное давление изменяются в диффузионных пленках, как показано на рис. 3.1. Концентрация газа в жидкой фазе равна концентрации его на границе между жидкостной пленкой и основной массой жидкости; в жидкостной пленке происходит снижение концентрации от величины C_1 до C_2 , отвечающей парциальному давлению p_2 диффундирующего газа на границе раздела фаз; в газовой пленке парциальное давление диффундирующего газа изменяется от величины p_2 до величины p_1 имеющей место на границе газовой пленки и основной массы газа, в которой парциальное давление диффундирующего газа также равно величине p_1 .

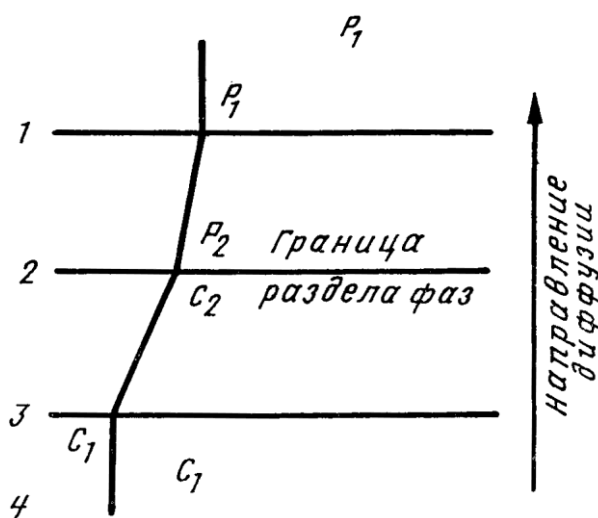


Рис. 3.1. Схема изменения давлений и концентраций газа на границе раздела фаз:

1, 4 – газообразная и жидкостная фазы; 2, 3 – газовая и жидкостная диффузионная пленка

По теории двухслойного поглощения, общее сопротивление десорбции R равно сумме сопротивлений, оказываемых пограничными диффузионными слоями:

$$R = R_1 + R_2, \quad (3.1)$$

где R_1 – сопротивление жидкостного пограничного слоя; R_2 – сопротивление газового пограничного слоя.

Величины, обратные сопротивлениям в пограничных слоях, называют частными или пленочными коэффициентами десорбции:

$$K_{ж} = \frac{1}{R_1}; K_{г} = \frac{1}{R_2}. \quad (3.2)$$

Численно частный коэффициент десорбции равен количеству удаляемого (десорбируемого) газа, передаваемого через единицу площади соприкосновения фаз в единицу времени при движущей силе в диффузионной пленке, равной единице.

Скорость процесса десорбции растворенного в воде газа в воздух определяется из выражения

$$v = \frac{dG}{TdA}, \quad (3.3)$$

где T – время, ч; A – площадь соприкосновения жидкой и газообразной фаз, м²; G – количество десорбируемого газа, кг/ч.

При малой концентрации десорбируемого газа в воде скорость процесса десорбции определяется средней движущей силой ΔC_{cp} и сопротивлением процессу диффузии в пленке жидкости $K_{ж}$

$$\frac{dG}{TdA} = \frac{\Delta C_{cp}}{R_1} = K_{ж} \Delta C_{cp}. \quad (3.4)$$

Согласно теории двухслойного поглощения, количество десорбируемого газа

$$G = K_{ж} A \Delta C_{cp}, \quad (3.5)$$

где K_0 – общий коэффициент десорбции, м/ч, который для случая десорбции труднорастворимых газов может быть приравнен к пленочному коэффициенту в жидкостной пленке $K_{ж}$; A – площадь соприкосновения жидкой и газообразной фаз, м²; ΔC_{cp} – средняя движущая сила процесса десорбции, кг/м³, которую для

случаев десорбции из малоконцентрированных растворов газов подсчитывают по уравнению

$$\Delta C_{cp} = \frac{(C_{вх} - C_{рвх}) - (C_{вых} - C_{рвых})}{2,3 \lg \frac{C_{вх} - C_{рвх}}{C_{вых} - C_{рвых}}}, \quad (3.6)$$

где $C_{вх}$ и $C_{вых}$ – концентрации удаляемого газа в воде соответственно на входе ее в аппарат и на выходе из него; $C_{рвх}$ и $C_{рвых}$ – равновесные концентрации удаляемого газа в воде соответственно при входе ее в аппарат и на выходе из него.

Таким образом, величина ΔC_{cp} зависит от разности концентраций удаляемого газа в воде и воздухе.

Основное расчетное уравнение аппаратов для извлечения из воды растворенных газов десорбцией записывается в следующем виде:

$$A = \frac{G}{K_o \Delta C_{cp}} \quad (3.7)$$

$$G = 0,001q(C_{вх} - C_{вых}),$$

где q – производительность аппарата, м³/ч.

Коэффициент сопротивления процессу диффузии в пленке жидкости $K_{жс}$ возрастает с увеличением относительной скорости движения воды и воздуха в десорбере, с повышением температуры и увеличением коэффициента диффузии удаляемого газа.

Из величин, входящих в общее уравнение десорбции, G и ΔC_{cp} , могут быть подсчитаны по заданным условиям работы дегазатора, величина $K_{жс}$ вычислена опытным путем или с помощью теории подобия. Это уравнение является основным для расчета десорбционных аппаратов. Из него находят необходимую поверхность соприкосновения жидкой и газообразной фаз для обеспечения заданного эффекта дегазации, а, следовательно, и размер проектируемых аппаратов.

3.1.2. Оборудование для дегазации воды

В технике водоподготовки для удаления газов из воды (кроме кислорода, ввиду его значительного парциального давления в воздухе) в основном применяют пленочные дегазаторы, а для обескислороживания воды – вакуумные дегазаторы или термические деаэраторы. Барботажные дегазаторы используют в исключительных случаях из-за их сравнительно высокой эксплуатационной стоимости (большой расход электроэнергии на компрессию воздуха).

Целесообразно использовать дегазаторы, загруженные пластмассовыми или керамическими кольцами Рашига и работающие при подаче в них воздуха вентилятором или вакуумно-эжекционные аппараты.

Самым совершенным типом дегазатора для глубокого удаления из воды свободного диоксида углерода (IV) считают *пленочный* дегазатор, загруженный *кольцами Рашига* (рис. 3.2, а). Он обеспечивает наиболее устойчивый эффект дегазации, долговечен, требует меньшей площади и высоты, а также меньшего расхода воздуха, чем дегазатор с деревянной хордовой насадкой. Строительная стоимость его близка к стоимости дегазаторов с деревянной насадкой, а эксплуатационная стоимость ниже, особенно для установок большой производительности. Наиболее целесообразно применять эти дегазаторы на крупных установках и при большом содержании свободного диоксида углерода (IV) в воде, поступающей в дегазатор.

Кольцо Рашига представляет собой полый керамический цилиндр, высота которого равна наружному диаметру. Для уменьшения высоты дегазатора выгоднее применять кольца более мелкого размера, так как единица объема насадки из таких колец имеет большую поверхность. Для загрузки дегазаторов наиболее часто применяют кольца размером 25х25х3 мм, так как общее сопротивление насадки из таких колец при наиболее неблагоприятных условиях работы аппарата не превышает значения напора, развиваемого центробежными вентиляторами среднего давления обычного типа.

Применение *вакуумных* дегазаторов (рис. 3.2, б) для удаления из воды свободной углекислоты целесообразно только в случаях Н-Na-катионитового

умягчения или ионитового обессоливания подземных вод, когда в обессоленной или умягченной воде лимитируется содержание кислорода. Наиболее полная дегазация достигается разбрызгиванием в вакууме с одновременным подогревом воды. Вакуумные дегазаторы также могут загружаться насадкой из колец Рашига.

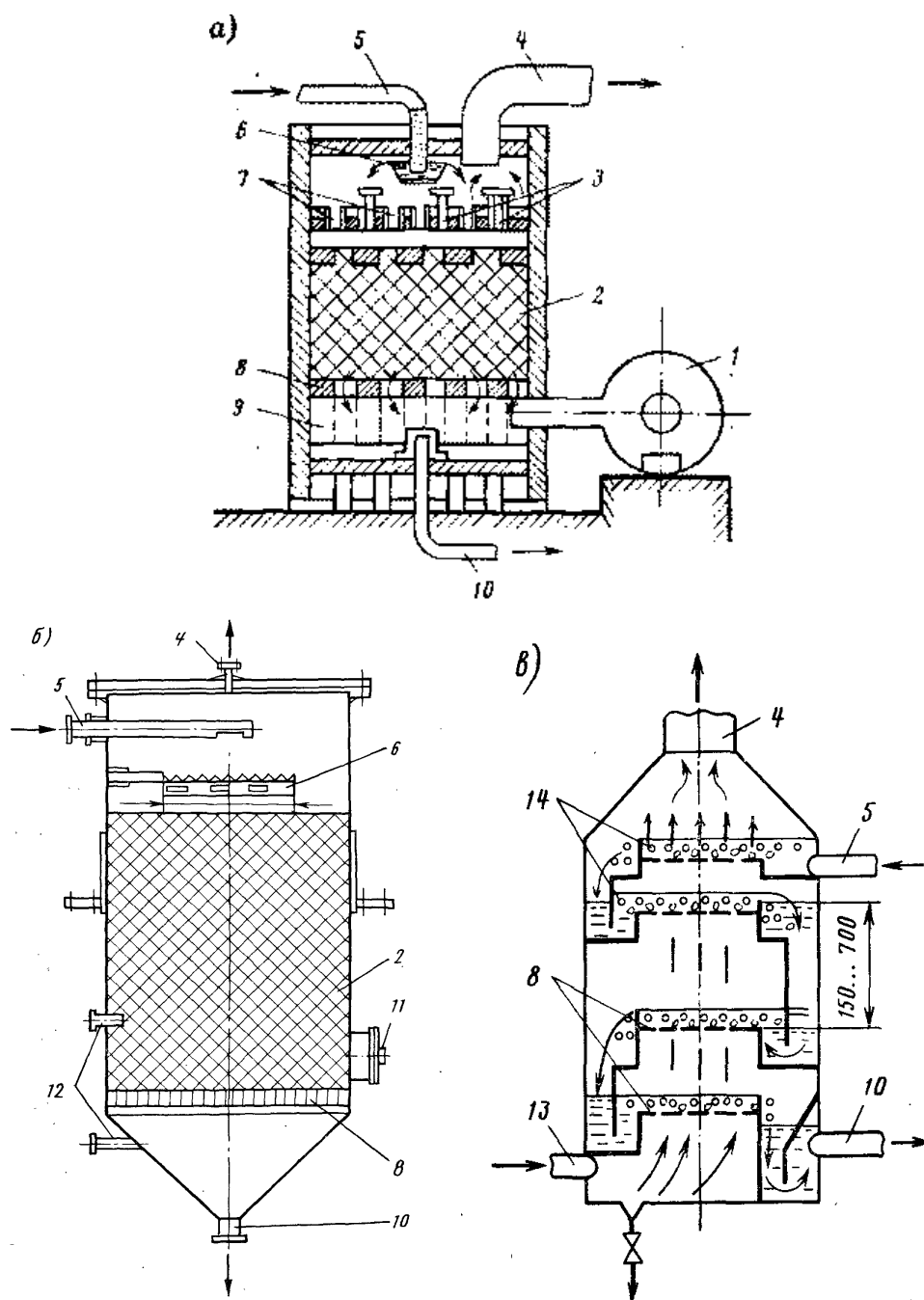


Рис. 3.2. Пленочный (а), вакуумный (б) и пенный (в) дегазатор:

1 – вентилятор; 2 – насадка из керамических колец Рашига; 3 – газоотводной патрубок; 5, 10 – ввод исходной и отвод дегазированной воды; 7 – оросительные патрубки; 4 – удаление воздуха; 9 –

поддон; 8 – дырчатое днище; 6 – водораспределительная воронка; 11 – люк; 12 – патрубки для водомерного стекла; 13 – ввод воздуха; 14 – пенный слой

При дегазации воды *барботированием* воздуха через слой воды также создается большая поверхность соприкосновения жидкой и газообразной фаз; тем самым ускоряется выделение газа. Воздух подается компрессорами обычно через дырчатые трубы или пористые плиты. В зависимости от требуемой степени дегазации воды барботажные дегазаторы применяют одно- или двухсекционные с последовательным пропуском воды.

Разновидностью барботажных дегазаторов являются дегазаторы пенного типа (рис. 3.2, в). Основным конструктивным элементом аппаратов служит перфорированная пластина (решетка). Вода тонким слоем протекает вдоль решетки и под действием поперечного тока воздуха, подаваемого через ее отверстия, вспенивается. В пенном слое газы из воды десорбируются интенсивно. При удалении диоксида углерода (IV) и расходе воды около 100 м³/ч дегазаторы пенного типа наиболее экономичны. При использовании аппаратов этого типа степень десорбции целесообразно ограничить 96...97% с тем, чтобы количество полок не превышало четырех-пяти. При этом для подачи воздуха можно применять центробежные вентиляторы среднего давления.

Для удаления из воды метана или свободного сероводорода также можно рекомендовать пленочные дегазаторы, загруженные пластмассовыми или керамическими кольцами.

Наиболее полная дегазация достигается разбрызгиванием в вакууме с одновременным подогревом воды. На рис. 3.3 изображена схема установки для дегазации в вакууме с подогревом и без подогрева воды.

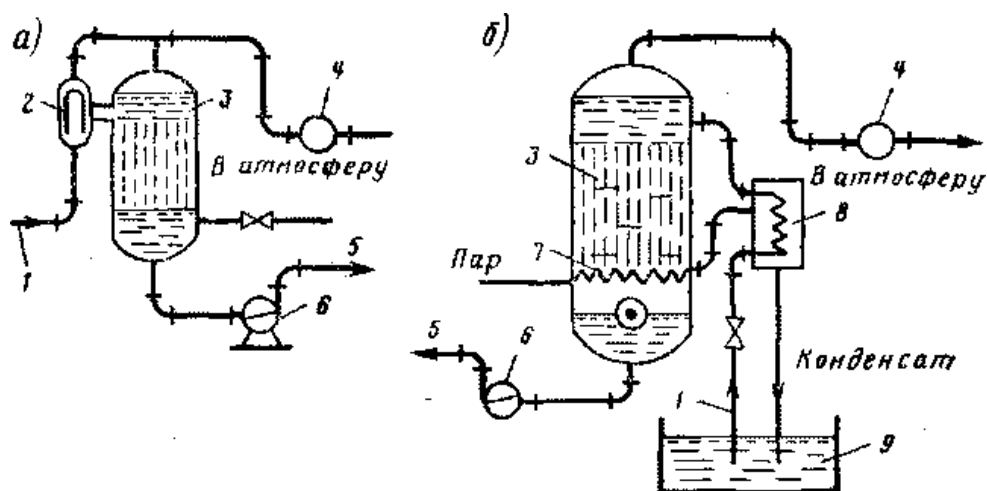


Рис. 3.3. Установки дегазации воды под вакуумом без подогрева (а) и с подогревом (б):

1 — подача исходной и отвод дегазированной воды; 2 — воздухоотделитель; 3 — котел; 4 — вакуум-насос; 6 — насос; 7 — подача пара; 8 — теплообменник; 9 — сборный бак

При проектировании дегазаторов для удаления из воды свободной углекислоты должны быть заданы параметры: расход воды; концентрация свободной углекислоты в воде, и желательное остаточное содержание свободной углекислоты в воде после дегазатора; наименьшая (расчетная) температура обрабатываемой воды.

Допустимые плотности орошения и расход воздуха при глубоком удалении диоксида углерода (до 2-3 мг/л) при исходной концентрации до 150 мг/л составляют $60 \text{ м}^3/\text{м}^2\text{ч}$ и $15 \text{ м}^3/\text{м}^3$ воды (для дегазаторов с кольцами Рашига размером 25x25x3 мм). При подсчете напора, развиваемого вентилятором, сопротивление колец при этих параметрах можно принимать 30 мм вод. ст. на 1 м высоты загрузки.

Помимо площади поверхности насадки, нужно учитывать площадь внутренней поверхности самого аппарата, которая составляет около 7,5% от площади поверхности насадки.

Концентрация свободной углекислоты в воде, подлежащей дегазации, не всегда указывается в анализе. Ее можно определить следующим образом. При дегазации воды после Н-катионитовых фильтров суммарное количество углекислоты будет равно:

$$C_{\text{вх}} = 44Ж_{\text{к}} + C_{\text{нач}}, \quad (3.8)$$

где $Ж_{\text{к}}$ – карбонатная жесткость исходной воды, мг-экв/л; $C_{\text{нач}}$ – содержание свободной углекислоты в исходной воде, мг/л, определяемое по номограмме (рис. 3.4). Первый член формулы учитывает свободную углекислоту образующуюся при распаде бикарбонатов.

Номограмма составлена для плотного растворенного остатка воды 20 мг/л и при температуре ее 22 °С. При иных значениях температуры и плотного остатка

$$C_{\text{нач}} = C_{\text{ном}} \alpha \beta, \quad (3.9)$$

где $C_{\text{ном}}$ – содержание свободной углекислоты, найденное по номограмме; α – поправка на температуру; β – поправка на плотный растворенный остаток.

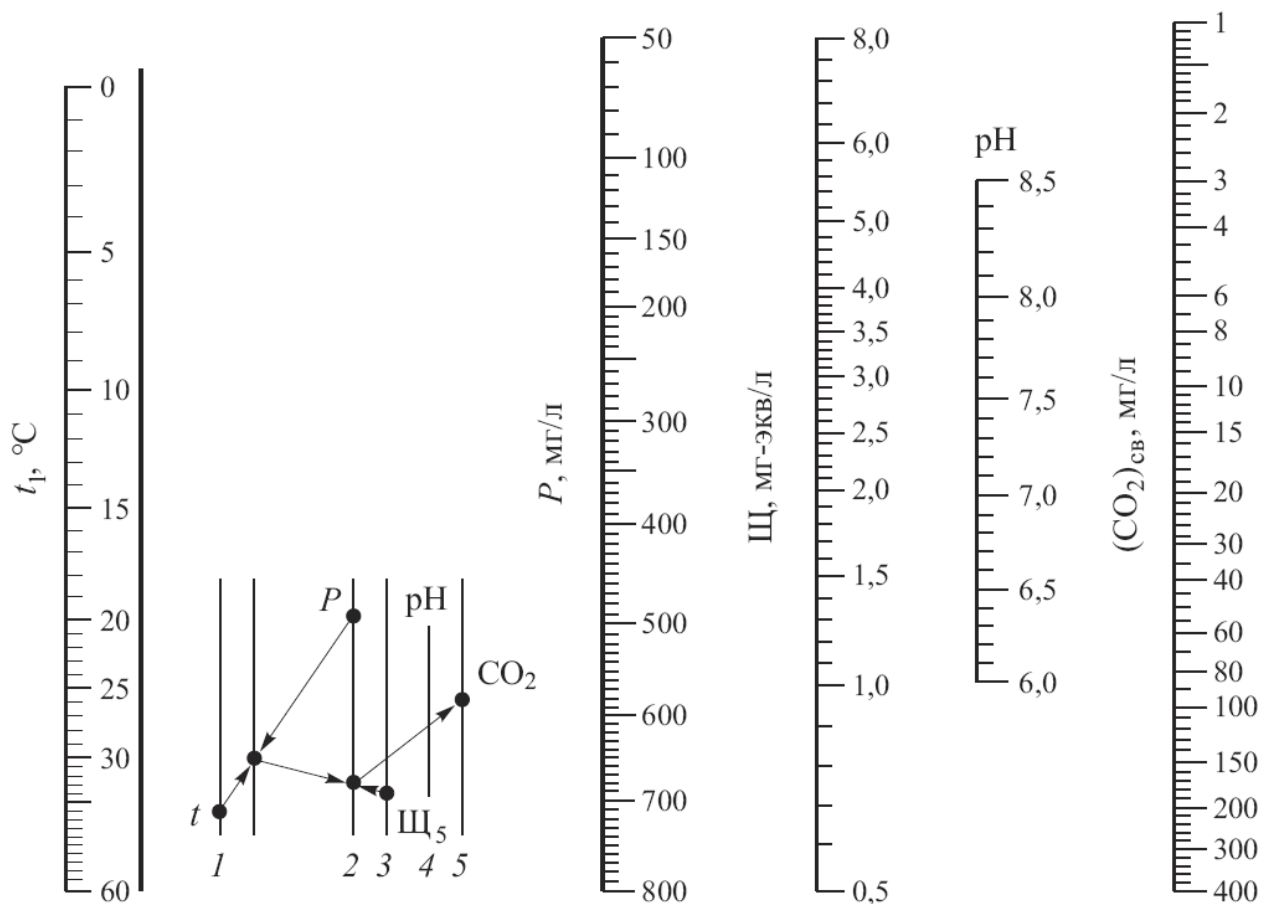


Рис. 3.4. Номограмма для определения содержания в воде свободной углекислоты.

При отсутствии в анализе данных о значении рН и щелочности воды концентрацию свободной углекислоты в исходной воде (в мг/л) можно ориентировочно определять по формуле:

$$C_{\text{нач}} = 0,268(J_{\text{к}})^3. \quad (3.10)$$

где $J_{\text{к}}$ – карбонатная жесткость воды, мг-экв/л.

При дегазации воды в цикле обезжелезивания воды аэрацией

$$C_{\text{вх}} = 1,57 C_{\text{Fe}} C_{\text{нач}}. \quad (3.11)$$

где C_{Fe} – содержание железа (II) в обезжелезиваемой воде, мг/л. Первый член формулы учитывает свободную углекислоту, выделяющуюся при гидролизе железа.

Для глубокого или частичного удаления оксида углерода (IV) (независимо от его начальной концентрации и производительности установки) и свободного сероводорода применяют дегазаторы с насадкой из колец Рашига и противотоком воды и воздуха, подаваемого вентилятором. Для удаления оксида углерода (IV) при производительности установки до 150 м³/ч и начальном его содержании не более 150 мг/л используют дегазаторы с деревянной хордовой насадкой или дегазаторы пенного типа. При глубоком удалении оксида углерода (IV) и производительности до 20 м³/ч применяют барботажные дегазаторы. В случае частичного удаления оксида углерода (IV) при производительности установки до 50 м³/ч используют струйно-пленочные (контактные) градири, а для глубокого или частичного обескислороживания воды – вакуумные установки с насадкой из колец Рашига.

Выбор типа дегазатора определяется производительностью установки, необходимой полнотой дегазации, начальной концентрацией удаляемого газа и другими условиями.

Полное обескислороживание воды может быть достигнуто методом, предложенным П.А. Акользиным. Сущность его заключается в том, что эжектор, подающий воду, из которой необходимо удалить кислород, подсасывает предварительно обескислороженный воздух. Под влиянием разности концентрации растворенный в воде кислород переходит из жидкой

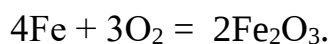
фазы в газообразную. Газ отделяется от воды в специальном десорбере и затем в сепараторе. Обескислороживание воздуха происходит в герметичном реакторе, загруженном древесным углем и омываемом топочными газами с температурой 500...800°C. Однако применение этого метода ограничивается тем, что для обескислороживания воздуха, подсасываемого эжектором, необходимы топочные газы высокой температуры, т. е. наличие котельной. Кроме того, в дегазаторе не удастся одновременно с обескислороживанием воды обеспечить необходимую степень удаления оксида углерода (IV).

3.1.3. Химические методы дегазации воды

В основе химических методов удаления из воды растворенных газов лежит их химическое связывание, достигаемое введением реагентов или фильтрованием через специальные загрузки. Для удаления из воды кислорода применяют ее фильтрование через легко окисляющиеся вещества, например, через стальные стружки, и обработку сульфитом натрия или оксидом серы (IV).

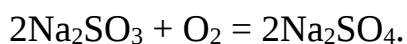
При использовании стальных стружек их обезжиривают и загружают в специальный фильтр, содержание марганца в них не должно превышать 0,3%.

В процессе фильтрования железо, окисляясь, связывает кислород



Оксид железа (III) и гидроксид железа (III), образовавшиеся в результате коррозии стружек, удаляют обратной промывкой. Продолжительность контакта воды со стружками зависит от температуры и уменьшается от 25 до 3 мин при увеличении температуры от 20 до 80°C.

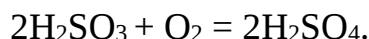
Чаще всего применяют обработку воды сульфитом натрия (для удаления 1 мг кислорода расходуется 7,9 мг сульфита натрия)



или оксидом серы (IV)

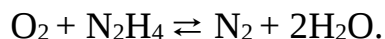


Образующаяся сернистая кислота окисляется кислородом, содержащимся в воде, до серной кислоты:



В качестве катализатора применяют соли меди (II) или кобальта (II) в виде 0,01%-ного раствора. Для удаления 1 мг кислорода расходуется 4 мг оксида серы (IV) или 7,9 мг сульфита натрия. Кроме того, для удаления кислорода воду обрабатывают также гидразином N_2H_4 .

Гидразин является сильным обескислороживающим реагентом:



Эта реакция протекает значительно быстрее, чем реакция окисления сульфита натрия. Катализаторами в данном случае являются металлическая медь, стекло и активированный уголь. Реакция обескислороживания воды гидразином каталитически ускоряется материалом стенок котла.

Гидразин применяют для обработки воды, идущей на питание прямоточных котлов, поскольку он не увеличивает количества сухого остатка питательной воды и не образует вредных летучих продуктов разложения. Недостатком метода обескислороживания воды гидразином является его высокая стоимость.

Эффективное обескислороживание воды может быть достигнуто в электролизерах с растворимыми железными или алюминиевыми электродами. Обескислороживание происходит за счет катодной и анодной деполяризации, а также химического окисления железа или алюминия растворенным в воде кислородом.

3.2. Удаление из воды кремниевой кислоты

Формы присутствия в воде кремниевой кислоты варьируются от коллоидной до ионнодисперсной в зависимости от ее температуры, pH и от соотношения различных примесей воды.

Воду, содержащую кремниевую кислоту, нельзя использовать для питания котлов высокого и сверхвысокого давления, в химико-фармацевтической

промышленности, при производстве капрона и текстиля, при переработке цветных металлов, в питьевой воде содержание кремния также нормируется.

Обескремнивание воды достигается: осаждением известью; сорбцией гидроксидами железа, алюминия, оксидом или гидроксидом магния; фильтрованием через магнезиальный сорбент; ионным обменом и электрокоагулированием.

Обескремнивание воды известью основано на небольшой растворимости силиката кальция. При наличии в исходной воде 10...12 мг/л кремниевой кислоты остаточное содержание ее в обработанной воде составляет 6...8 мг/л. С избытком извести и повышением температуры глубина обескремнивания возрастает. Так, если подлежащую обескремниванию воду нагреть в каскадном подогревателе до температуры 80...90°C и насытить известью в сатураторе (рис. 2.51), то при этом выпадают в осадок гидроксид магния, сорбирующий SiO_3^{2-} , силикат и карбонат кальция. Вода обескремнивается и частично умягчается.

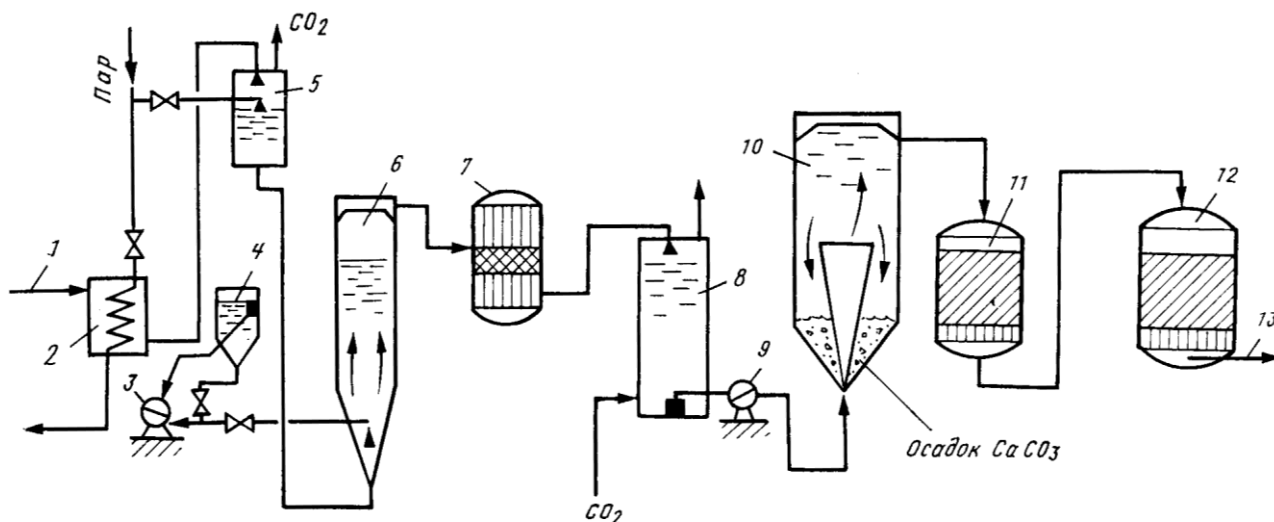


Рис. 3.5. Установка обескремнивания воды известью с подогревом:

1, 13 – подача исходной и отвод декремнизированной воды; 2 – теплообменник; 3 – насос-дозатор; 4 – бак известкового молока; 5 – дегазатор; 6 – сатуратор; 7 – фильтр с мраморной крошкой; 8 – скруббер; 9 – повысительный насос; 10 – напорный осветлитель; 11 – фильтр с мраморной (или антрацитово́й) крошкой; 12 – натрий-катионитовый фильтр с термостойким катионитом

Обескремнивание воды солями железа основано на способности хлопьев гидроксида железа (II), образующегося при введении в воду его солей, сорбировать молекулярно-дисперсную и коллоидную кремниевую кислоту.

Установка, используемая для обескремнивания воды сульфатом железа (II) или хлоридом железа (III), состоит из вертикального смесителя, дозаторов реагента и известкового молока, осветлителя, фильтра и насоса для рециркуляции осадка. Благодаря рециркуляции осадка значительно снижается расход коагулянта.

На снижение содержания кремниевой кислоты с 12...14 до 2 мг/л расходуется 300...350 мг сульфата железа (II). Оптимальные значения pH (8,5...9,5) поддерживаются добавлением в воду извести.

Обескремнивание воды солями алюминия основано на их способности сорбировать кремниевую кислоту из раствора. В качестве реагентов применяют алюминат натрия и сульфат алюминия.

Концентрация остаточной кремниевой кислоты при использовании алюмината натрия составляет 0,5...2 мг/л; расход алюмината – 150...200 мг/л. Применение вместо алюмината натрия более дешевого сульфата алюминия уменьшает глубину декарбонизации и увеличивает содержание сульфатов, что нежелательно для вод, идущих на питание паровых котлов.

Высокой сорбционной способностью по SiO_3^{2-} обладают *хлопья алюмината магния*, образующиеся при одновременном введении в воду солей магния и алюмината натрия при pH выше 8,5. Для получения оптимального значения pH воду подщелачивают.

Перечисленные методы имеют недостатки, среди которых наиболее значительными являются большой расход и высокая стоимость реагентов, а также увеличение количества сухого остатка декремнизированной воды.

При *фильтрационном методе обескремнивания воды* фильтры *загружаются* магнезиальными сорбентами (*полуобожженным доломитом*, а также специальным сорбентом, получаемым обработкой измельченного каустического магнезита соляной кислотой), *активированным оксидом*

алюминия, бокситами. Технология получения магнезимального сорбента следующая: смесь каустического магнезита с соляной кислотой или хлоридом магния, имеющую консистенцию теста, высушивают при температуре 80...100°C, измельчают и просеивают. Полученный магнезимальный сорбент представляет собой зерна светлосерого цвета крупностью 0,5...1,5 мм. Массовое отношение Mg/Cl в сорбенте примерно составляет 1,5:1, а его насыпная масса 0,75...0,85 т/м³. Сущность обескремнивания воды фильтрованием через такой сорбент заключается в образовании мало растворимого в воде силиката магния.

При высоте слоя сорбента в фильтре 3,4...4,0 м, температуре воды до 40...50°C и скорости фильтрования до 10 м/ч, содержание кремниевой кислоты в воде снижается до 0,1...0,3 мг/л. Один кубометр сорбента поглощает до полного истощения 90 кг SiO₂.

Недостаток метода заключается в необходимости через каждые шесть месяцев (при среднем содержании в исходной воде до 10 мг/л SiO₂) менять загрузку фильтра, поскольку сорбент не регенерируется.

Большой практический интерес представляет использование активированного оксида алюминия и бокситов в качестве загрузки обескремнивающего фильтра. При скорости фильтрования 5...6 м/ч слой сорбента толщиной 1,5 м снижает содержание кремниевой кислоты до 0,1...0,5 мг/л. Фильтр регенерируется 0,1%-ным раствором щелочи. За один цикл 1 м³ активированного оксида алюминия поглощает из воды 10...12 кг SiO₃²⁻. Большое преимущество фильтрационного метода заключается в компактности установок и простоте их обслуживания.

Анионитовый метод обескремнивания воды в цикле ионитового обессоливания с сильноосновными анионитами обеспечивает снижение концентрации кремнекислых соединений до 0,03...0,05 мг/л.

Сущность анионитового метода обескремнивания и одновременного обессоливания воды заключается в следующем: воду пропускают через Н-катионитовые фильтры, где из нее извлекаются катионы Ca(II), Mg(II), K(I) и Na(I). Затем вода проходит через фильтры со слабоосновным анионитом, где

она избавляется от анионов сильных кислот (SO_4^{2-} , Cl^- , NO_2^-). После дегазации воды для удаления из нее оксида углерода (IV) ее пропускают через фильтры с сильноосновным анионитом, где удаляется слабая кремниевая кислота. Для получения воды с общим содержанием соли менее 1 мг/л, в том числе с общим содержанием кремниевой кислоты менее 0,03 мг/л, применяют трехступенчатые схемы ионирования. К недостаткам этого метода следует отнести его сравнительно высокую стоимость, что объясняется большим расходом едкого натра на регенерацию и быстрым уменьшением в процессе эксплуатации кремнеемкости высокоосновных анионитов. Это вынуждает заменять их через каждые 1,5...2 года.

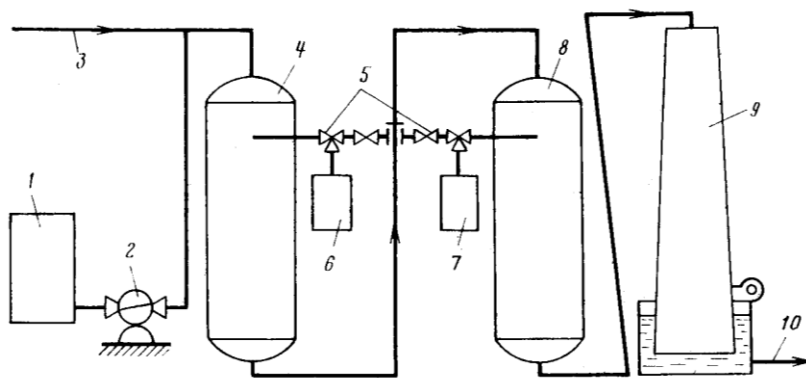
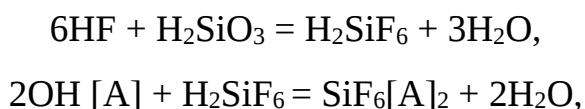


Рис. 3.6. Схема обескремнивания воды фторидным методом:

1 – бак с раствором фторида натрия; 2 – насос-дозатор; 3, 10 – подача исходной и отвод обессоленной и декремнизированной воды; 4 – водород-катионитовый фильтр; 5 – эжектор; 6, 7 – бак с раствором щелочи и серной кислоты; 8 – ОН-анионитовый фильтр; 9 – дегазатор

Фторидный метод обескремнивания воды (рис. 3.6) специальными реагентами дает возможность использовать слабоосновные аниониты. Этот метод состоит в том, что дозируемые в обрабатываемую воду плавиковая кислота или фторид натрия переводят кремниевую кислоту в сильную кремнефтористоводородную, которая достаточно полно поглощается слабоосновными анионитами:





В современных схемах водоподготовки для паровых котлов кремнекислота эффективно удаляется методом обратного осмоса.

3.3. Обработка охлаждающей воды

3.3.1. Причины и виды зарастания охлаждающих аппаратов. Водный режим систем оборотного водоснабжения. Стабильность воды по карбонату кальция. Углекислотные равновесия. Индексы стабильности воды

Стабильность воды является одним из основных показателей ее качества. Обесцвеченную и осветленную на очистных сооружениях воду нельзя считать удовлетворительной по качеству, если она, проходя по трубам, приобретает окраску или образует осадок.

Нарушение стабильности воды может быть вызвано наличием растворенной угольной кислоты, сероводорода или кислорода, низким значением рН, пересыщенностью угольной кислоты или кислорода, пересыщенностью ее карбонатом кальция или гидроксидом магния, повышенной концентрацией сульфатов либо хлоридов.

В природных водах углекислота содержится в виде недиссоциированных молекул H_2CO_3 (обычно в очень малых концентрациях), молекулярно растворенного углекислого газа CO_2 , бикарбонатных ионов HCO_3^- , а при величине $\text{pH} > 8,4$ в виде карбонатных ионов.

Угольная кислота имеет две степени диссоциации:



Из уравнений диссоциации угольной кислоты следует, что соотношения между ее соединениями в растворе CO_2 , HCO_3^- и CO_3^{2-} при данной температуре зависят от концентрации водородных ионов, т.е. от величины рН. При температуре 25° при значениях $\text{pH} = 3,7\text{--}4,0$ вся находящаяся в воде угольная

кислота представлена только одним соединением CO_2 . По мере повышения значений pH доля CO_2 уменьшается при одновременном увеличении доли HCO_3^- . При значениях $\text{pH} = 8,3\text{--}8,4$ практически вся присутствующая в воде угольная кислота представлена бикарбонат-ионами HCO_3^- (более 98%), а на долю $\text{CO}_2 + \text{CO}_3^{2-}$ приходится менее 2%. При дальнейшем повышении значений pH воды (более 8,3–8,4) свободной углекислоты в воде уже нет, а доля карбонатных ионов CO_3^{2-} возрастает при одновременном уменьшении доли HCO_3^- . При величине $\text{pH} = 12$ вся углекислота представлена только одним соединением CO_3^{2-} .

В водных растворах существует динамическое равновесие между различными формами угольной кислоты:



Из этого уравнения следует, что для поддержания в растворе опресненной концентрации бикарбонатных ионов требуется, чтобы в растворе находилось соответствующее этой концентрации количество свободной углекислоты.

При недостатке количества углекислоты CO_2 возникает тенденция к распаду части бикарбонатных ионов, т.е. к сдвигу равновесия, описываемого уравнением (3.13), вправо с образованием дополнительного количества CO_2 и одновременно ионов CO_3^{2-} . Увеличение концентрации карбонатных ионов приводит к тому, что они будут реагировать с находящимися в воде ионами кальция, образуя карбонат кальция по реакции:



Воду, содержащую свободную углекислоту в концентрации, превышающей равновесную, называют агрессивной, поскольку она вызывает коррозию стальных трубопроводов. Вода, содержащая избыток карбонатных ионов, считается нестабильной по карбонату кальция, вызывая выделение карбонатных отложений из воды на теплопередающих поверхностях оборудования и трубопроводов.

Оценку термостабильности воды (степени насыщения воды по карбонату кальция) определяют расчетным путем по данным физико-химического состава. Для этого разработаны специальные критерии (индексы).

В настоящее время специалистами используются несколько индексов (Ланжелье, Ризнера, Сноинка-Джексона и др.). Каждому индексу соответствует модель состава стабильной воды, описывающая процесс образования карбонатных отложений. Наличие разных индексов говорит о сложности происходящих в природных водах процессов и невозможности создать универсальную модель.

Ланжелье предложил характеризовать условия стабильности воды с помощью индекса насыщения:

$$J = pH - pH_s, \quad (3.15)$$

где pH – значение pH воды, pH_s – величина pH , отвечающая равновесному состоянию в растворе углекислых соединений или «величина равновесного насыщения воды карбонатом кальция».

Величина pH_s определяется по следующей формуле:

$$pH_s = pK_2 - p\Pi_{CaCO_3} - \lg[Ca^{2+}] - \lg Щ + 2,5\sqrt{\mu} + 7,6, \quad (3.16)$$

Формула (3.16) получена из уравнений I и II ступеней диссоциации угольной кислоты и уравнения произведения растворимости карбоната кальция.

Ионная сила вычисляется по формуле:

$$\mu = 0,5(C_1Z_1^2 + C_2Z_2^2 + \dots + C_nZ_n^2), \quad (3.17)$$

где C_1, C_2, C_n – концентрации ионов 1, 2... n, г-ион/л; Z_1, Z_2, Z_n – валентности тех же ионов.

Формулу (1.24) представляют в удобном для расчетов виде:

$$pH_s = f_1(t) - f_2(Ca^{2+}) - f_3(Щ) + f_4(P), \quad (3.18)$$

где: $f_1(t)$ – функция температуры воды, позволяющая определить значения термодинамических констант от температуры; $f_2(Ca^{2+})$ – функция концентрации иона кальция; $f_3(Щ)$ – функция концентрации щелочности; $f_4(P)$ – функция общего солесодержания воды.

Расчеты по формуле (3.18) удобно проводить с помощью расчетного графика, показанного на рис. 3.7. Слева на каждой шкале отложены числовые значения показателей качества воды, справа – значения функций этих величин, которые подставляют в формулу (3.18).

Оценка стабильности воды, т.е. величины отклонения ее углекислотной системы от равновесного состояния производится путем сравнения измерений величины pH воды с вычисленным по формуле (3.18) значением величины pH_s . Если $pH < pH_s$, это указывает на то, что концентрация углекислоты в воде превышает равновесную. Такую воду называют агрессивной или коррозионной. Значение индекса Ланжелье J , соответствующее коррозионной воде – отрицательно. Считая, что коррозионная вода, растворяя карбонат кальция, исключает возможность образования на стенках стальных и чугунных труб защитной карбонатной пленки и способствует растворению коррозионных железистых отложений. При отсутствии карбонатной защитной пленки поверхность металла оказывается легко подвержена коррозии, особенно при наличии в воде растворенного кислорода.

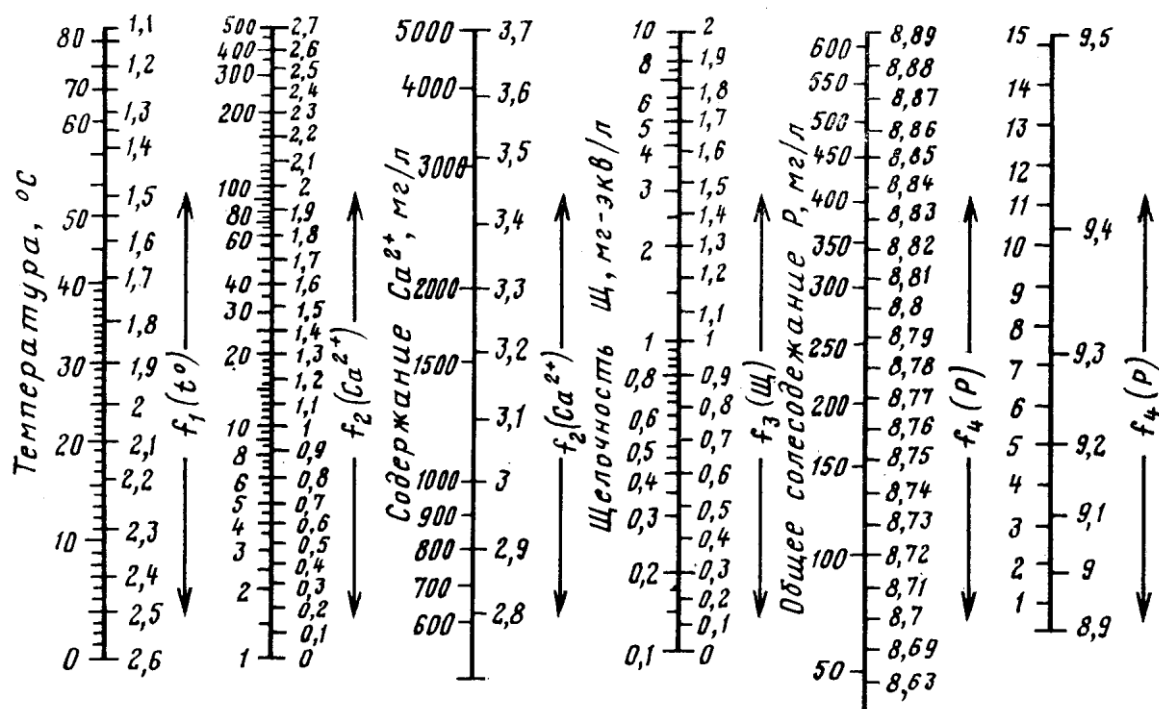


Рис. 3.7. Номограмма для нахождения pH_s .

При $pH > pH_s$ в воде не достает свободной углекислоты по сравнению с ее равновесной концентрацией. Такую воду называют некоррозионной или неагрессивной. Значение индекса Ланжелье при $pH > pH_s$ отрицательно, при таком состоянии вода является пересыщенной по карбонату кальция и в ней существует опасность образования карбонатных отложений. Рекомендуемое значение индекса Ланжелье в системах оборотного водоснабжения составляет от 0 до 1.

Индекс Ризнера дает несколько другие численные значения характеристик стабильной воды:

$$R = 2pH_s - pH, \quad (3.19)$$

где pH – измеренное значение pH воды, pH_s – значение, вычисленное по формуле (3.18) и рис. 3.7.

Рекомендуемое значение R для стабильной воды должно находиться в пределах от 6 до 7.

Индекс Сноинка-Джексона (SN) также представляет собой разность между фактическим значением pH воды и гипотетической величиной H_{SN} , соответствующей состоянию насыщения по карбонату кальция.

Однако, в отличие от индекса Ланжелье, индекс SN учитывает недостающие при определении общей щелочности концентрации ионов CO_3^{2-} и OH^- из уравнения:

$$Щ = [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}] + [OH^-]. \quad (3.20)$$

Индекс Сноинка-Джексона определяется путем совместного решения уравнения второй ступени диссоциации угольной кислоты, уравнения произведения растворимости, ионного произведения воды:

$$f_H[H^+] \cdot f_{OH}[OH] = K[H_2O] = K_{IN}, \quad (3.21)$$

Из уравнений (1.28) и (1.29) получим:

$$H_{SN}^+ = [Ca^{2+}] \cdot [HCO_3^-] \cdot \frac{K_2}{PP_{CaCO_3}} \cdot \frac{f_{Ca^{2+}} \cdot f_{HCO_3^-} \cdot f_{CO_3^{2-}}}{f_{H^+}}. \quad (3.22)$$

Из формулы (1.30), получено уравнение для определения значения индекса Сноинка-Джексона:

$$H_{SN}^+ = [Ca^{2+}] \cdot \frac{K_2}{PP_{CaCO_3}} \cdot \left(Щ - \frac{K_w}{f_H[H^+]} \right) \cdot \left(\frac{[H^+] \cdot f_H}{f_H[H^+] - K_2} \right) \cdot \frac{f_{Ca^{2+}} \cdot f_{HCO_3^-} \cdot f_{CO_3^{2-}}}{f_{H^+}}. \quad (3.23)$$

Индекс Сноинка-Джексона при расчете pH_{SN} учитывает значение рН исходной воды, что дает более точные данные стабильности воды.

Описанные индексы имеют пределы применимости. Они отражают лишь те коррозионные свойства воды, которые зависят от наличия в воде агрессивной углекислоты. Они не применимы для определения агрессивности воды, контактирующей с пассивирующимися металлами, скорость коррозии которых уменьшается с повышением концентрации кислорода.

3.3.2. Стабилизационная обработка воды

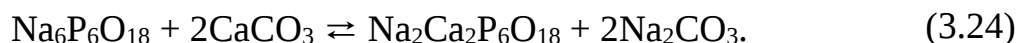
Для борьбы с коррозией стальных и чугунных труб в промышленном водоснабжении применяют ингибитор *гексаметафосфат* или *триполифосфат натрия*. Их действие проявляется в образовании защитных пленок на катодных и анодных участках поверхности металла и в торможении коррозионного процесса.

Доза гексаметафосфата или триполифосфата натрия, применяемых для обработки воды, используемой только в промышленном водоснабжении, принимается равной 2–4 мг/л. При вводе в эксплуатацию новых участков трубопроводов предусматривают заполнение их на 2–3 сут раствором указанных реагентов с концентрацией 200–250 мг/л.

При стабилизационной обработке фосфатными реагентами воды, используемой для питьевых целей, остаточное содержание фосфат-ионов в соответствии с СанПиН 1.2.3685-21 не должно превышать 3,5 мг/л.

При положительном индексе насыщения воду стабилизируют добавлением ингибиторов — гексаметафосфата, натрия, триполифосфата натрия, тринатрийфосфата.

Гексаметафосфат натрия ($Na_6P_6O_{18}$) обладает поверхностно-активными свойствами и адсорбируется на поверхности зародышей кристаллов карбоната кальция в виде пленки гексаметафосфата кальция и натрия согласно уравнению



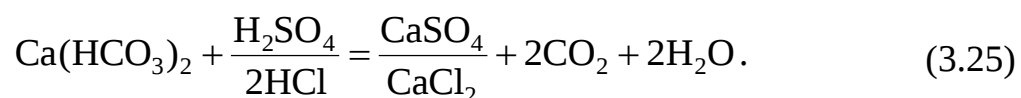
Изолируя зародыши, пленка препятствует росту микрокристаллов. Следовательно, действие реагента сводится к торможению роста кристаллов карбоната кальция, повышая их растворимость.

Стабилизационная обработка важна для предотвращения образования накипи в теплообменниках. В основе действия тринатрийфосфата ($\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) лежит перевод накипи в шлам. Реагент формирует в воде малорастворимый ортофосфат кальция, который, адсорбируясь на гранях кристаллов карбоната кальция, вызывает изменение их формы и препятствует агломерации первичных агрегатов, в результате вместо накипи образуется рыхлый, легко удаляемый шлам.

Следует иметь в виду, что защитное действие фосфатов ограничивается карбонатной жесткостью воды 5,5–6,0 мг-экв/л, выше которой наблюдается рост кристаллов и выпадение карбоната кальция.

Для борьбы с процессами солеотложений и коррозии институтом ИРЕА (Москва) разработаны новые реагенты: Аминат А и Аминат ОД.

При положительном индексе насыщения воду стабилизируют подкислением серной или соляной кислотой, обработкой гексаметафосфатом или триполифосфатом натрия:



При подкислении понижается содержание в воде гидрокарбонатов и увеличивается концентрация оксида углерода (IV), который, находясь в равновесном состоянии с гидрокарбонатами, препятствует образованию карбоната кальция и зарастанию трубопроводов.

Подкисляют воду технической серной или соляной кислотой. Серная кислота (ГОСТ 2184-87*) представляет собой бесцветную маслянистую жидкость, содержащую 75...92,5% H_2SO_4 . Поставляется в стальных цистернах или стеклянных бутылках. Соляная кислота (ГОСТ 1382-89) – бесцветная дымящаяся жидкость, содержащая не менее 27,5% HCl , поставляется в

гуммированных цистернах или стеклянных бутылках. Эти кислоты смешиваются с водой в любых соотношениях. Для подкисления воды применяют растворы кислот. Учитывая высокую коррозионную активность разбавленных серной и соляной кислот, для их приготовления, транспортирования и хранения следует применять кислотостойкое оборудование и аппаратуру.

Дозу кислоты, мг/л, в пересчете на товарный продукт находят по формуле

$$D_{\text{кис}} = \frac{\alpha e_{\text{кис}} \text{Щ}}{C_{\text{кис}}} 100, \quad (3.26)$$

где α – коэффициент, зависящий от рН среды (определяется по графикам 3.8); Щ – щелочность воды до стабилизационной обработки, мг-экв/л; $e_{\text{кис}}$ – эквивалентная масса кислоты, мг/мг-экв (для серной кислоты $e_{\text{кис}} = 49$, для соляной – 36,5); $C_{\text{кис}}$ – содержание активной кислоты в товарном продукте, %.

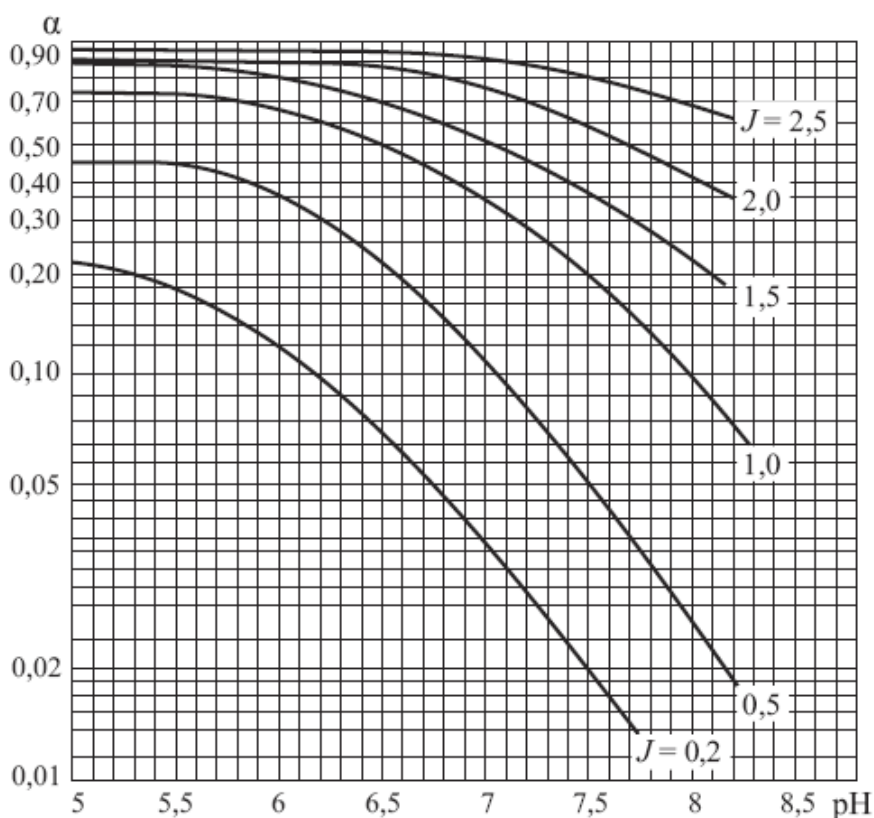
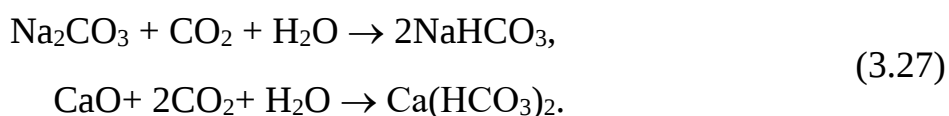


Рис. 3.8. Графики $\alpha = f(\text{pH})$

Стабилизационная обработка воды *при отрицательном индексе стабильности* заключается в ее подщелачивании, фильтровании через мраморную крошку или магномассу, или удалении оксида углерода (IV) аэрированием. При этом предусматривается также создание условий для образования защитной карбонатной пленки на внутренней поверхности труб.

В качестве подщелачивающих реагентов используют едкий натр, известь или соду. Соду применяют только в том случае, если в воде содержатся ионы кальция в количестве, достаточном для образования защитной пленки карбоната кальция. Щелочные реагенты следует подавать в очищенную воду перед вторичным хлорированием и поступлением ее в резервуары чистой воды, в связи с чем необходимо обеспечить хорошее осветление растворов реагентов. Допускается введение щелочных реагентов до отстойников или фильтров, если это не ухудшает технологического процесса очистки воды и не снижает эффективности ее стабилизационной обработки.

Указанные реагенты, применяемые для стабилизации воды связывают оксид углерода (IV) по реакциям



Стабилизацию воды, содержащей оксид углерода (IV), производят фильтрованием ее в открытых безнапорных фильтрах через мраморную крошку (CaCO_3), полуобожженный доломит-магномассу $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgO}$ или обожженный магнезит MgO . Фильтры загружают крошкой перечисленных выше материалов с размером частиц 0,5–3 мм, высоту слоя принимают равной до 2 м, скорость фильтрования воды через мраморную крошку – до 10, через магномассу – 10–20 м/ч; она зависит от температуры и щелочности воды, а также от концентрации в ней агрессивного оксида углерода (IV). Промывают фильтрующий слой восходящим потоком воды с интенсивностью 15 л/(с·м²) в течение 10...15 мин; при водовоздушной промывке интенсивность подачи воздуха – 20...25 л/(с·м²) в течение 5 мин. с последующей промывкой водой с интенсивностью 3...4 л/(с·м²) в течение 2–3 мин. Содержание железа в

поступающей на фильтры воде не должно превышать 0,5 мг/л. Большие концентрации железа приводят к цементированию зерен фильтрующей загрузки. Фильтры периодически догружают зернистым активным материалом, пополняя его расход на стабилизационную обработку воды; для связывания 1 мг агрессивного оксида углерода (IV) расходуется 2,3 мг мрамора или 1,1 мг магномассы.

Стабилизация воды на малых водоочистных установках при отрицательном индексе насыщения может быть достигнута удалением из нее избыточного оксида углерода (IV). С этой целью воду пропускают через вакуумно-эжекционный аппарат или вентиляторную градирню с кольцевой пластмассовой насадкой или насадкой из колец Рашига. Нагрузка на градирню в первом случае составляет 70, во втором – 60 м³/(м²·ч), расход воздуха принимают равным 20 м³/м³ воды. Значение рН воды после градирни определяют по номограмме (см. рис. 3.7), принимая остаточное содержание СО₂ в воде равным 8–10 мг/л (до 3–5 мг/л) и щелочность воды равной исходной.

Для борьбы с коррозией труб рекомендуется магнитная обработка воды. Предполагают, что под действием магнитного поля растворенный в воде кислород активируется и образует с железом ферромагнитные оксиды, предохраняющие поверхность металла от агрессивных сред. Концентрация кислорода в воде при этом уменьшается. Применяют магнитные установки чаще всего в системах оборотного водоснабжения.

При наложении магнитного поля в массе воды формируются центры кристаллизации, вследствие чего выделение накипеобразователей происходит не на теплопередающей поверхности нагрева или охлаждения, а в объеме воды с образованием вместо твердой накипи мигрирующего тонкодисперсного шлама, легко удаляемого с поверхности теплообменников и трубопроводов. Вода в магнитных аппаратах должна двигаться перпендикулярно магнитным силовым линиям.

3.4. Охлаждение оборотной воды

3.4.1. Классификация оборотных вод по степени нагрева при их использовании в промышленности

Для охлаждения различного рода технологического оборудования в России используется примерно 65% от общего расхода воды промышленными предприятиями и теплоэнергетическими объектами.

Требования, предъявляемые к температуре оборотной воды различными промышленными предприятиями, диктуются технологическим процессом и эксплуатационными свойствами оборудования.

В табл. 3.1 приведены данные об использовании оборотной воды в промышленности, требования к ее температуре в летний период и наличии загрязнений. Количество загрязнений в воде не указано, поскольку оно для одного и того же вида производства может быть различным из-за неодинаковых состояния оборудования, уровня эксплуатации, наличия очистных сооружений и др. Высокие значения водооборота достигаются в нефтеперерабатывающей отрасли, на предприятиях черной и цветной металлургии, а также нефтехимии. Предприятия теплоэнергетической отрасли потребляют две трети свежей воды, забираемой на промышленные нужды из источников водоснабжения, при наибольшем расходе ее для охлаждения технологического оборудования (96%).

Вода в промышленности и энергетике используется для конденсации и охлаждения газообразных и жидких продуктов химических и нефтехимических производств, для конденсации отработавшего пара после расширения его в паровых двигателях, отвода теплоты от маслоохладителей и оборудования в целях предохранения его от быстрого разрушения под влиянием высоких температур (например, цилиндров компрессоров, кладки производственных печей) и т. п.

Таблица 3.1

Данные об использовании оборотной воды в промышленности и энергетике

Отрасль	Расход воды на охлаждение, %	Водооборот, %	Расход оборотной воды на крупных предприятиях, тыс. м ³ /ч	Температура воды, °С		Вид загрязнений
				нагретой в технологическом оборудовании	охлажденной на градирне	
Теплоэнергетическая	96	60	1000	37-45 ¹	30-33	Условно чистая
				35-38 ²	30-33	То же
				35-40 ³	25-30	Нефтепродукты
Нефтеперерабатывающая	95	94	100	40-45	25-28	Механические примеси, нефтепродукты
Химическая и нефтехимическая	74-95	64-96	100	40-45	25-30	Органические, минеральные примеси
Черная металлургия	75	93	300 ⁴	40-45 ⁵	30-35	Механические примеси, нефтепродукты
				35-40 ⁶	25-28	То же
Цветная металлургия	20	91	5	35-40	25-30	То же
Целлюлозно-бумажная	7	65	1	32-35 ⁷	25-27	Условно чистая
Предприятия легкой промышленности	-	-	6	35-36	27-28	То же

¹ Конденсаторы паровых турбин. ² Воздухоохладители обмоток генераторов. ³

Маслоохладители. ⁴ На комбинатах и заводах с полным металлургическим циклом.

⁵ Холодильники доменных печей и др. ⁶ Воздухоохладители и маслоохладители.

⁷ Конденсаторное оборудование.

Как следует из табл. 3.1, в зависимости от вида производства, требования, предъявляемые к температуре охлаждающей воды, различаются. Эти требования диктуются условиями производственных процессов и определяются экономичностью и надежностью работы оборудования.

На многих промышленных предприятиях эксплуатируются компрессорные установки. Для того, чтобы температура сжимаемого воздуха, выходящего из компрессора, не превышала допустимого для нормальной и безопасной работы предела 140–160 °С, используется его охлаждение. Чаще всего применяется водяное охлаждение рубашек компрессоров, при котором охлаждающая вода, прошедшая поверхностные холодильники компрессоров, после охлаждения на градирнях вновь используется.

Расход оборотной воды при температурном перепаде 10-25 °С рассчитывается таким образом, чтобы ее температура после поверхностных холодильников не превышала 45 °С из-за предупреждения выпадения солей временной жесткости и образования накипи на охлаждаемой поверхности.

3.4.2. Процессы охлаждения воды в охладителях

Как указывалось выше, в системах оборотного водоснабжения наиболее широко используются испарительные градирни, брызгальные бассейны, водохранилища-охладители. Охлаждение воды в них протекает в результате совместного действия процессов тепло- и массообмена при непосредственном соприкосновении свободной поверхности жидкости с атмосферным воздухом, при этом жидкость и газ обмениваются теплотой благодаря соприкосновению и излучению. Кроме того, происходит поверхностное испарение жидкости. Большую часть года (весна, лето, осень) преобладающую роль играет поверхностное испарение. При низких зимних температурах роль поверхностного испарения снижается и доля отдаваемого водой тепла, приходящаяся на теплоотдачу соприкосновением, увеличивается.

Теплообмен излучением является существенным только при большой открытой поверхности охлаждаемой воды. В этом случае солнечная радиация

значительно снижает охлаждающий эффект, несмотря на некоторую компенсацию за счет передачи теплоты водой поверхности за счет излучения. Процесс испарения (тепло- и массообмен) является комплексным процессом, в котором перенос теплоты взаимно связан с переносом вещества. При испарительном охлаждении воды приближенно принимается, что парциальное давление паров воды в слое воздуха, непосредственно расположенном у поверхности воды, равно давлению насыщенного пара P''_{nt} при средней температуре воды.

Основная масса воздуха над поверхностью жидкости не насыщена водяными парами. Если принять, что водяной пар подчиняется законам идеального газа, то парциальное давление пара в основной массе воздушного потока $P_{n\theta}$ при температуре θ , °C будет равно:

$$P_{n\theta} = \varphi P''_{nt}, \quad (3.28)$$

где φ – относительная влажность воздуха в долях единицы; P''_{nt} – давление насыщенного пара при температуре основной массы потока воздуха θ , °C.

Разность парциальных давлений

$$\Delta P_n = P''_{nt} - P_{n\theta} \quad (3.29)$$

является «движущей силой» или «разностью потенциалов», благодаря которой осуществляется перенос пара, образующегося при испарении жидкости, от поверхности воды в основную массу воздушного потока. В условиях работы испарительных охладителей парциальное давление воздуха P''_{nt} всегда выше парциального давления пара $P_{n\theta}$, поэтому независимо от того, больше или меньше температура воды температуры окружающего воздуха, величина $P''_{nt} - P_{n\theta}$ положительна. Следовательно, испарение происходит всегда. Ввиду того, что испарение требует затрат теплоты на изменение агрегатного состояния пара, оно вызывает поток теплоты q_β только от воды к воздуху, а следовательно, охлаждение воды. Поток теплоты вследствие теплоотдачи соприкосновением q_α может иметь направление как от воды к воздуху, так и от воздуха к воде в зависимости от того, какая из этих сред имеет более высокую температуру. При температуре воды больше температуры воздуха теплоотдача

за счет испарения и соприкосновения (теплопроводность и конвекция) направлена от воды к воздуху. Количество теплоты, отдаваемое водой, в этом случае равно:

$$Q = q_{\alpha} + q_{\beta}. \quad (3.30)$$

Если же температура воздуха выше температуры воды, то поток тепла q_{α} направлен от воздуха к воде. В этом случае результирующее количество теплоты, отдаваемое жидкостью, равно:

$$Q = q_{\beta} - q_{\alpha}. \quad (3.31)$$

Температура воды будет понижаться, пока количество теплоты q_{β} , теряемое жидкостью благодаря ее поверхностному испарению, больше притока теплоты к воде q_{α} . Понижение температуры прекратится, когда направленный от воздуха к воде поток теплоты q_{α} станет равным потерям теплоты водой от испарения q_{β} . Равновесие между q_{α} и q_{β} носит динамический характер, так как ни испарение жидкости, ни подвод теплоты от воздуха не прекращаются. Однако, чтобы процессы тепло- и массообмена могли протекать беспрепятственно, к поверхности воды должно быть подведено количество теплоты q , равное количеству теплоты, отдаваемой ею в результате совместного действия обоих процессов. Для этого температура поверхностного слоя жидкости t_f должна быть ниже температуры основной ее массы t , т.е. должна существовать положительная разность температур $\Delta t = t - t_f$. Величина Δt зависит от условий переноса теплоты в жидкости за счет теплопроводности и конвекции.

Количественное соотношение между теплоотдачей соприкосновением и теплоотдачей испарением зависит от конкретных условий. С увеличением температуры воды общие теплопотери возрастают, причем теплоотдача испарением увеличивается быстрее, чем теплоотдача соприкосновением. При снижении температуры воды до температуры воздуха по сухому термометру потери теплоты соприкосновением становятся равными нулю, а при дальнейшем снижении температуры воды поток теплоты q_{α} будет направлен от воздуха к воде. Когда температура воды, снижаясь, приближается к

температуре воздуха по влажному термометру t , тогда потери теплоты водой в результате испарения q_{β} остаются положительными; в то же время отрицательные потери теплоты соприкосновением возрастают по абсолютной величине. При снижении температуры воды до температуры воздуха по влажному термометру отрицательные теплопотери соприкосновением q_{α} становятся равными положительным потерям теплоты при испарении q_{β} . Наступает равновесное динамическое состояние, при котором результирующая составляющая теплоотдачи равна нулю и вода не снижает свою температуру. Следовательно, вода может быть охлаждена до температуры более низкой, чем начальная температура охлаждающего ее воздуха (по сухому термометру); это свойственно только испарительному охлаждению. Теоретическим пределом охлаждения воды является температура воздуха по влажному термометру.

В общем виде уравнение теплового баланса в испарительных охладителях имеет вид:

$$CM\Delta tT + R = q_{\alpha} + q_{\beta}, \quad (3.32)$$

где C – удельная плотность воды, кг/м^3 ; $M = \rho W$ – массовый расход воды, кг/с ; ρ – удельная плотность воды, кг/м^3 ; W – объемный расход воды, $\text{м}^3/\text{с}$; Δt – разница температур горячей и охлажденной воды, $^{\circ}\text{C}$; T – рассматриваемый период, сут; R – приток теплоты от солнечной радиации, Дж.

Процессы, происходящие при испарительном охлаждении, более сложные, чем теплообмен через твердую стенку. Последний имеет место в охладителях, охлаждение в которых происходит без контакта охлаждаемой воды с атмосферным воздухом – через стены теплообменников (радиаторов). Такой теплообмен называется конвективным. Он происходит при одновременном действии конвекции и теплопроводности. Конвективный теплообмен зависит от разнообразных факторов, в том числе: режима движения жидкости и воздуха, свободного или принудительного их движения, плотности, вязкости, коэффициента теплопроводности и температуропроводности жидкости и воздуха, формы и размера участвующей в конвективном теплообмене поверхности.

Удельное количество теплоты, переданной через стенку радиатора, определяется формулой Ньютона

$$q_p = \alpha_p(t - \theta), \quad (3.33)$$

где q_p – удельное количество теплоты, кДж/(м³/ч); α_p – общий коэффициент теплопередачи от воды к воздуху через стенку радиатора, кДж/(м²·ч·°С); t – температура воды, проходящей через радиатор, °С; θ – температура воздуха, обтекающего радиатор, °С.

Коэффициент α_p определяют по экспериментальным данным.

3.4.3. Охлаждающие устройства систем промышленного водоснабжения. Устройство и конструкции охладителей. Водохранилища-охладители

В качестве охлаждающих устройств применяют водохранилища-охладители, брызгальные бассейны, градирни различных конструкций.

Водохранилища-охладители применяются для охлаждения воды тепловых и атомных электростанций при невысоких требованиях к эффекту охлаждения воды, незначительном удалении от водоемов, наличии малоценных свободных площадей для их устройства. В качестве водохранилищ-охладителей используются русловые и пойменные участки рек, перекрываемые плотинами; пойменные участки водотоков, из которых создается искусственное водохранилище; водохранилища комплексного назначения; водохранилища гидроэлектростанций; озера и моря (рис. 3.9). Охлаждение нагретой воды происходит с поверхности водохранилища, участвующей в циркуляции потока на его пути от места сброса до водозаборных сооружений; за счет процессов тепло- и массообмена, а также за счет поступления поверхностных и грунтовых вод.

Циркуляционный поток не охватывает всю площадь водохранилища. Его конфигурация и площадь зависят от формы и глубины водоема, взаимного расположения водовыпускных и водозаборных сооружений, наличия сооружений, изменяющих его величину. Охлаждающая способность водохранилища-охладителя зависит от следующих показателей:

- площади, в границах которой происходит движение потока от водовыпуска к водозабору, именуемое транзитным потоком;
- числа и площади водоворотов, т.е. таких зон водохранилища, в которых имеет место кругообразное движение жидкости, обусловленное конфигурацией водоема и формой транзитного потока;
- тепловой нагрузки, т.е. количества теплоты, поступающей в охладитель с теплой водой;
- метеорологических условий: скорости и направления ветра, температуры и влажности воздуха, величины солнечной радиации и естественной температуры воды в водохранилище (под естественной температурой подразумевается температура воды, которая устанавливается в неподогретом водоеме под действием метеорологических и климатических факторов в районе его расположения).

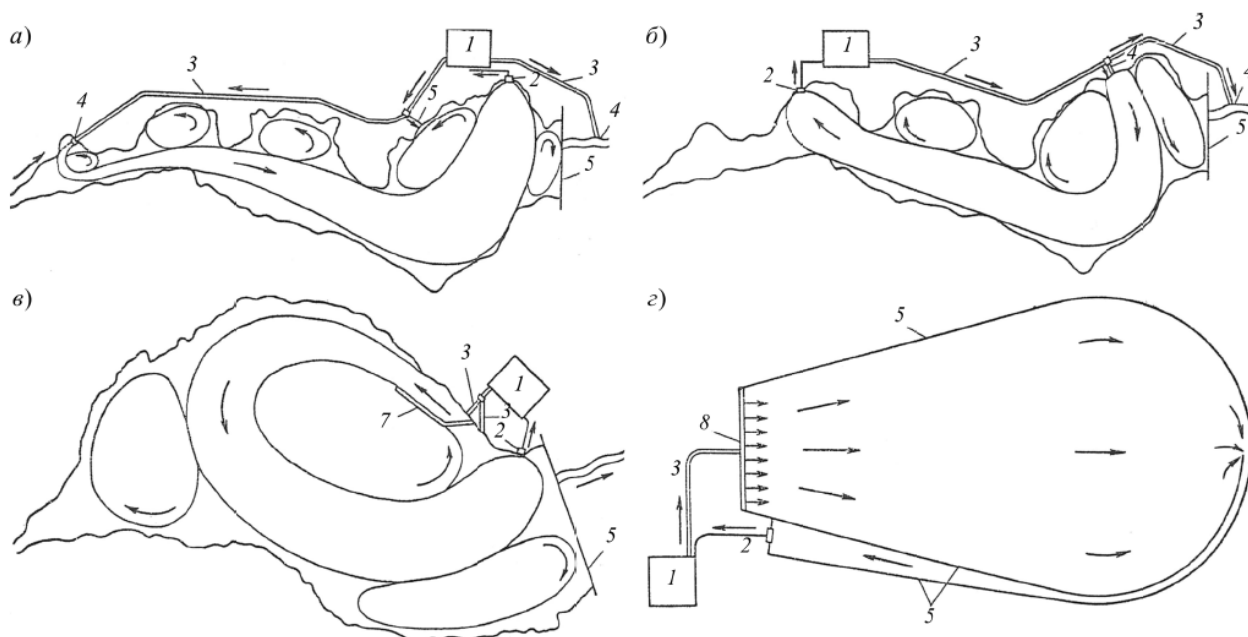


Рис. 3.9. Схема циркуляции воды в прудах-охладителях.

а – в пруду вытянутой формы; б – при водозаборе в верхней части пруда; в – в пруду округлой формы; г – в пруду-охладителе вне водотока; 1 – промышленная площадка; 2 – насосная станция водозабора; 3 – водоотводящий канал; 4 – сброс теплой воды; 5 – плотина; 6 – зимний сброс; 7 – струенаправляющая дамба; 8 – струераспределительное сооружение

Основным показателем является площадь активной зоны. Она рассматривается как площадь некоторого условного водоема с параллельно-струйным нестратифицированным (нерасслаивающимся) потоком, необходимая для охлаждения при соответствующих метеорологических условиях. Активная зона водохранилища – это сумма активной зоны транзитного потока и активной зоны; водоворотов. Помимо активной зоны существует тупиковая зона – часть водохранилища, в которой под влиянием сил инерции и разности плотностей имеет место объемная циркуляция – встречные течения поверхностного и донного слоев. Отношение площади активной зоны к площади зеркала водохранилища (< 1) называется коэффициентом использования водохранилища-охладителя. Величина коэффициента зависит от формы водоема, расположения водовыпуска и водозабора, а также условий растекания циркуляционного потока.

Классификация водохранилищ-охладителей и схемы их использования

По назначению водохранилища подразделяются на два типа:

- водохранилища-охладители, используемые только для целей охлаждения воды;
- водохранилища-охладители, используемые комплексно, в целях орошения, рыборазведения, транспортирования, отдыха и др.

Также существуют различия по размерам площадей: небольшие – площадь не более 5 км², средние – от 5 до 10 км² и большие с площадью более 10 км². По глубинам водохранилища-охладители подразделяются на мелководные с глубиной до 5 м, средние – от 5 до 10 м и глубоководные – свыше 10 м. В мелких водохранилищах отсутствует температурная стратификация, за исключением зон, непосредственно примыкающих к водовыпускным сооружениям; около этих сооружений возникают плотностные течения вследствие эжектирующего воздействия выходящих нагретых струй. Для глубоких водохранилищ характерна устойчивая температурная стратификация потока в теплое время года; целесообразно использование глубинного забора

воды. При средних глубинах температурное расслоение воды не столь устойчиво и может исчезать в периоды продолжительных и сильных ветров.

Водохранилища могут быть проточными и непроточными. В первом случае они имеют постоянный приток и сток воды, во втором – пополнение водой осуществляется либо в паводок, либо путем подкачки из других водоемов. Если отвод теплоты, полученной от предприятия, происходит со всей поверхности водоема, то водохранилище считается нагруженным, в противном случае – ненагруженным. Возможны различные схемы использования водохранилищ-охладителей.

Прямоточная схема – схема, в которой вода используется однократно. Ее можно осуществлять на реках с минимальными расчетными расходами, превышающими циркуляционный расход не менее чем в 3–4 раза, или на крупных ненагруженных водоемах. В случае если производство базируется на реках или проточных водоемах с минимальными расчетными расходами, превосходящими циркуляционный расход менее чем в 3–4 раза, может быть использована смешанная схема; тогда наблюдается рециркуляция теплой воды к водозаборным сооружениям, которые забирают смесь воды естественного стока и рециркуляционного расхода. Если в качестве водохранилища-охладителя использован непроточный водоем, емкость которого достаточна и поддерживается на необходимом уровне, применяется обратная схема.

Комбинированная схема предусматривает применение в качестве охладителя как водохранилища, так и других охладителей градирен и брызгальных устройств.

Организация водохранилищ-охладителей. При организации водохранилищ-охладителей должна быть выбрана такая схема циркуляции, которая обеспечивала бы получение воды наиболее низкой температуры при минимальных затратах на строительство и эксплуатацию. Схема циркуляции воды зависит от взаимного расположения водоприемных и водовыпускных сооружений, а также сооружений, повышающих коэффициент эффективности охладителя.

К сооружениям, повышающим площадь активной зоны водохранилищ-охладителей, относятся струераспределительные и струенаправляющие сооружения (см. рис. 3.9). Первые строят, как правило, у места выпуска теплой воды в охладитель и предназначаются для расширения фронта растекания циркуляционного потока; вторые – для удлинения пути циркуляционного потока. Струераспределительные сооружения выполняются в виде перегородок со щелью и водосливных сооружений, оборудованных шандорами для регулирования распределения воды, а также напорных труб, открытых консольных лотков и т.п. Получили распространение водовыпускные сооружения в виде фильтрующих дамб из каменной наброски. Наиболее рациональными являются струераспределительные сооружения с рассредоточенным спокойным выпуском нагретой воды на поверхность зеркала водоема. В ряде случаев в водохранилищах-охладителях, подлежащих комплексному использованию, возникает необходимость ограничения зоны с повышенными температурами из экологических соображений. Для этого организуется сброс теплой воды в водоем в глубинные слои. Непосредственное сопряжение отводящего канала с ложем водохранилища применяется на мелких водохранилищах вытянутой формы, где начальная ширина выходящего потока не имеет существенного значения.

К струенаправляющим сооружениям относятся дамбы из каменной наброски, земляные дамбы с креплением камнем против размыва волнами. Эти сооружения позволяют увеличить коэффициент использования площади зеркала водохранилищ за счет удлинения пути циркуляционного потока. Схема расположения водовыпускных и водозаборных сооружений определяется многими факторами: формой водохранилища, соотношением его ширины и длины; наличием тупиковых зон; организацией движения циркуляционной воды по акватории водоема (круговое, поперечное, продольное); типом водохранилища, озера и моря.

Выбор схемы циркуляции воды, а также типа сооружений, улучшающих работу охладителя, производится с помощью моделирования и построения плана течений, тепловых и технико-экономических расчетов.

Основной особенностью водохранилищ-охладителей, базирующихся на водохранилищах ГЭС, крупных озерах и морях, является то, что площадь их акватории заведомо достаточна для охлаждения циркуляционного расхода воды. При использовании водоемов, обеспечивающих забор воды с минимальной температурой, охладительную способность всего водоема не определяют.

Область применения водохранилищ-охладителей определяется следующими показателями: удельная тепловая нагрузка 230–460 Вт/м²; разность температуры охлажденной воды t_2 и температуры атмосферного воздуха по смоченному термометру $\tau = 6\text{--}8$ °С. Приблизительно можно считать, что для охлаждения 1 м³/ч воды на 5–10 °С требуется от 30 до 50 м² активной площади водохранилища-охладителя.

3.4.4. Брызгальные бассейны

При невысоких требованиях к эффекту охлаждения воды, наличии открытой для доступа воздуха площади и необходимости создания запасов воды на территории промышленного предприятия применяют брызгальные бассейны. Брызгальный бассейн представляет собой открытый прямоугольный бетонный или железобетонный резервуар с гидроизоляционным экраном из двух и более секций, над которыми через сопла разбрызгивается охлаждаемая вода. Вода к соплам поступает под напором по водораспределительным трубам. Бассейн располагается длинной стороной перпендикулярно направлению господствующих ветров.

При вылете из сопла водяная струя разбивается на капли, каждая из которых по траектории тела, брошенного под углом к вертикали, встречает сопротивление воздуху; поэтому размеры, углы вылета и начальные скорости отдельных капель различны, траектории их движения не совпадают и они

образуют вокруг сопла «факел». Движение воздуха в пределах брызгального бассейна, как и в случае водохранилища-охладителя, определяется ветром и естественной конвекцией.

Процесс испарительного охлаждения в брызгальном бассейне еще сложнее, чем в водохранилище-охладителе. Существенным отличием является то, что скорость движения капель в значительно большей степени влияет на процесс тепломассообмена, чем абсолютная скорость воздуха в пределах бассейна. При отсутствии ветра нагретый и увлажненный воздух поднимается над брызгальным устройством вверх, а на смену ему по периметру бассейна притекает наружный холодный воздух. При наличии ветра эта схема изменяется, и теплый воздух сносится по направлению ветра. Отсутствие теоретического решения процесса охлаждения в бассейнах приводит к необходимости пользоваться экспериментальными данными. Охлаждающий эффект этих сооружений зависит в основном от климатических и конструктивных факторов: температуры и влажности воздуха, наличия ветров, типа сопел и др.

Охлаждение будет протекать тем лучше, чем благоприятней условия для отдачи тепла испарением и соприкосновением, которые обеспечиваются созданием большой поверхности соприкосновения охлаждаемой воды с воздухом, равномерностью распределения воды и воздуха по площади охладителя, свободным доступом воздуха на площадку бассейна. Все это достигается разбрызгиванием воды на капли, правильным выбором конструкции сопел, их размещением, а также расположением бассейна на территории промышленной площадки.

Бассейны брызгальных устройств служат для сбора охлажденной воды и создания необходимого запаса воды. Они выполняются в выемке или полувыемке с пологими откосами. План бассейна с одиночно расположенными соплами 1 на распределительных трубопроводах 2 приведен на рис. 3.10. Ширина бассейна в осях крайних сопел не должна превышать 50 м. Для уменьшения уноса капель воды ветром крайние сопла устанавливаются на

расстоянии 7–10 м от границы бассейна в зависимости от величины напора у сопел и скорости ветра; образовавшаяся зона называется защитной.

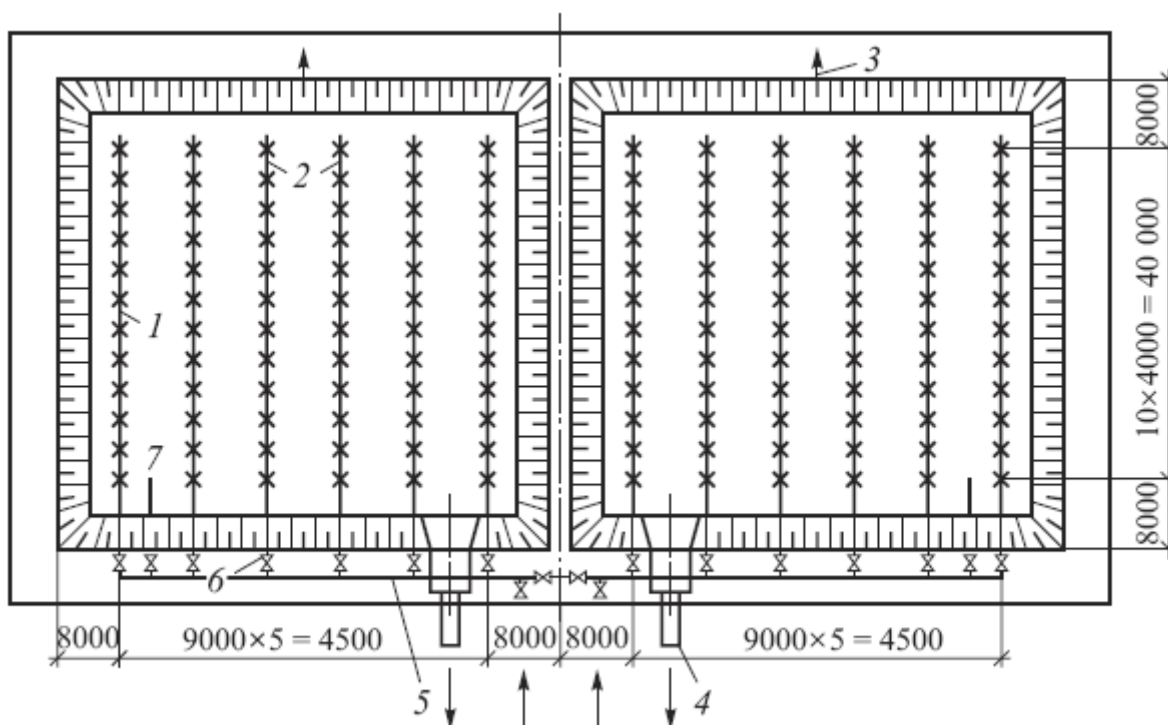


Рис. 3.10. План брызгального бассейна с эвольвентными соплами:

1 – сопла; 2 – распределительные трубопроводы; 3 – спускная труба в сеть канализации; 4 – отводящий трубопровод; 5 – коллектор; 6 – задвижки; 7 – трубопровод для сброса воды без разбрызгивания

Вокруг брызгальных бассейнов предусматривают водонепроницаемое покрытие шириной не менее 2,5 м с уклоном, который обеспечивает отвод воды, которая выносится ветром из бассейнов. Каждую секцию бассейна оборудуют трубопроводами для отвода излишков воды. Днище должно иметь уклон в сторону приемка со спускной трубой в сеть канализации 3. На отводящем охлажденную воду трубопроводе 4 устанавливают сороудерживающую решетку с ячейками не более 30 мм. Глубину воды в бассейне принимают не менее 1,7 м. Расстояние от уровня воды до борта бассейна не менее 0,3 м.

Трубопроводы брызгальных устройств выполняются обычно из стали. Гидравлический расчет их производят из условия, чтобы разница напоров

между наиболее удаленными соплами не превышала 0,5 м. Распределительные линии присоединяют к коллектору 5, который прокладывают вдоль одного из бортов бассейна. На концах распределительных линий устанавливают сопла для их промывки. Отдельные линии отключают на ремонт с помощью задвижек 6. В целях поддержания необходимого температурного режима в зимнее время в каждой секции брызгального бассейна предусматривают трубопровод 7 для сброса воды без разбрызгивания.

Для разбрызгивания воды применяются разбрызгивающие сопла различных типов: центробежные, щелевые и ударные (рис. 3.11). При оценке качества сопел следует учитывать целый ряд факторов: простоту конструкции и массу, степень засоряемости и возможность их прочистки без снятия с места установки, величину гидравлического сопротивления, равномерность распределения воды по площади факела, способность сопел разбивать выбрасываемую струю воды на мелкие капли, производительность сопла и его стоимость.

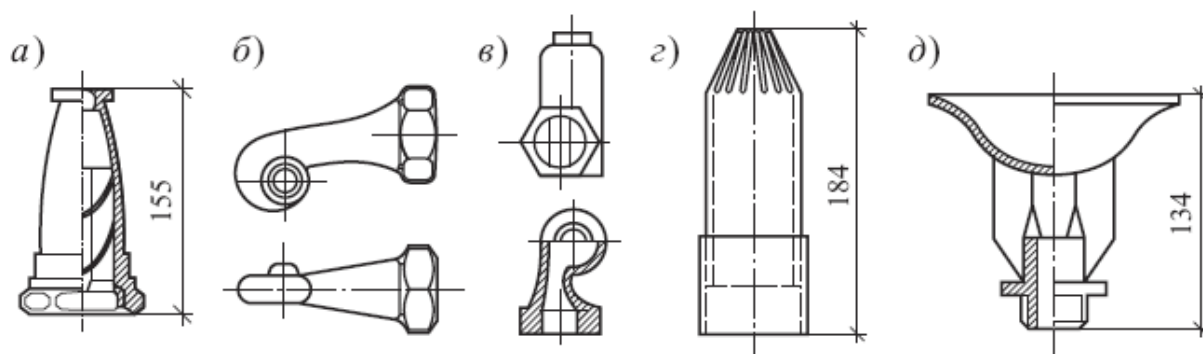


Рис. 3.11. Типы разбрызгивающих сопел:

*а – центробежные сопла МОТЭП; б – эвольвентные; в – центробежные сопла «Гипротис»;
г – щелевого типа П-16; д – сопла ударного действия с отражателями*

В центробежных соплах (рис. 3.11, а–в) разбрызгивание воды происходит по спирали под действием центробежных сил. Сопла щелевого типа (рис. 3.11, г) разбрызгивают воду через щелевые отверстия. К соплам ударного действия (рис. 3.11, д) относятся сопла с отражателями, в которых разбрызгивание воды

происходит при ударе струи об отражатель и струеударные сопла, в которых разбрызгивание воды происходит при соударении струй. Поверхность охлаждения водяного факела определяется конструкцией сопла и величиной напора воды перед ним. При повышении напора поверхность факела увеличивается за счет удлинения траектории падения капель и уменьшения их диаметра, однако повышение напора приводит к увеличению затрат электроэнергии и выносу мелких капель воды ветром.

Работа брызгальных устройств может совмещаться с работой водохранилищ-охладителей, когда их охлаждающая способность недостаточна. Брызгальные устройства рекомендуется устанавливать вблизи водозабора, где обеспечивается смешение воды от разбрызгивающих сопел с охлажденной водой, поступающей из водохранилищ.

Брызгальные устройства устанавливают и на берегу водохранилищ-охладителей. При таком размещении должно быть предусмотрено создание в основании небольшого слоя воды (0,1–0,15 м), препятствующего размыву дна и предупреждающего образование брызг. При установке брызгальных устройств над акваторией водохранилища прокладка трубопроводов осуществляется на сваях или поплавках. Область применения брызгальных бассейнов определяется следующими показателями: удельная тепловая нагрузка в пределах от 5,8 до 23 Вт/м²; температурный перепад 5–10 °С; разность температуры охлажденной воды и температуры атмосферного воздуха по смоченному периметру 10–12 °С.

3.4.5. Градирни

Градирни используются в системах оборотного водоснабжения, требующих устойчивого и глубокого охлаждения воды. Они проектируются по типовым и индивидуальным проектам. Охладительный эффект градирен возрастает с увеличением контакта воды с воздухом, который достигается различными способами.

По принципу охлаждения воды градирни могут быть испарительными, поверхностными и гибридными. По способу подвода воздуха к охлаждаемой воде испарительные градирни подразделяют на три основные группы:

- открытые, или атмосферные, поступление воздуха в которые происходит продувкой их ветром и естественной конвекцией;
- башенные, имеющие естественную тягу воздуха за счет разности плотностей наружного воздуха и нагретого влажного воздуха внутри градирни;
- вентиляторные, движение воздуха в которых происходит за счет тяги, создаваемой вентиляторами.

К поверхностным относятся радиаторные (так называемые «сухие» градирни), охлаждение воды в которых происходит через стенку радиаторов. Движение воздуха в этих градирнях обеспечивается либо вентиляторами, либо за счет тяги, создаваемой башней.

Гибридные градирни представляют собой комбинацию испарительной и радиаторной градирен. Большинство испарительных градирен, несмотря на разнообразие конструкций, имеют ряд общих элементов. К ним относятся: водораспределительные системы, оросительные устройства, водоуловители, сборные резервуары.

Водораспределительные системы

Водораспределительная система предназначена для равномерного распределения охлаждаемой воды по поверхности орошения градирни, в результате которого создается необходимая поверхность водного потока, определяющая его охлаждающую способность.

Водораспределительные устройства градирен можно разделить на три основные группы: разбрызгивающие, без разбрызгивания и подвижные. Разбрызгивающие устройства, в свою очередь, подразделяются на безнапорные и напорные.

В любом случае диапазон размеров капель и пленок воды, создаваемых водораспределителем, должен, с одной стороны, способствовать уменьшению

капельного уноса из градирни, а с другой – не допускать образования водяных струй в оросителе.

Напорная схема (рис. 3.12) представляет собой систему трубопроводов, выполненную из металлических, асбестоцементных, пластмассовых труб, которые оборудованы разбрызгивающими соплами. Подвод воды в систему напорного водораспределения осуществляется подводящим водоводом к стояку. По коллекторам, присоединенным к стояку, вода поступает в периферийную зону орошения, а затем по распределительным трубопроводам подводится к соплам. Установка разбрызгивающих сопел осуществляется двумя способами: направленными вниз факелами и направленными вверх факелами. Тип сопел распределительной системы аналогичен соплам, используемым в брызгальных бассейнах (см. рис. 3.11).

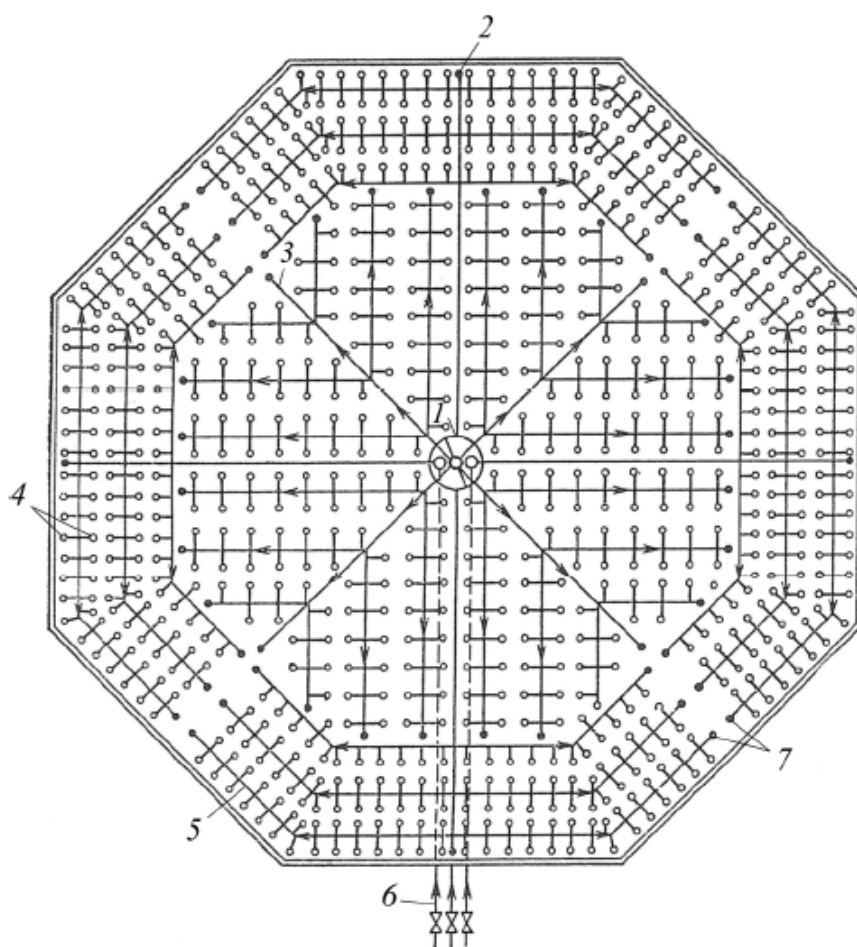


Рис. 3.12. Схема напорного водораспределителя:

1 – стояк; 2, 3 – коллекторы; 4 – сопла; 5 – распределительные трубопроводы; 6 – подводящие трубопроводы; 7 – «промывные» сопла

Водораспределение осуществляют таким образом, чтобы была возможность отключения отдельных частей системы, что необходимо для перераспределения плотности орошения в зимнее время. При безнапорной системе водораспределения вода к разбрызгивающим устройствам поступает по лоткам. Разбрызгивание воды в безнапорных системах осуществляется обычно с помощью гидравлических насадок и тарелочек (рис. 3.13). Тарелочки устанавливаются под соплами. Гидравлический расчет напорных систем заключается в определении диаметров труб и напора воды в начале системы. Расчету предшествуют определение типа и размеров разбрызгивающих сопел, их числа, разработка схемы расположения трубопроводов. Скорость движения воды в трубопроводах принимают в пределах 1,5–2,0 м/с. Гидравлический расчет лотков обычно не производят. Поперечное сечение их устанавливают по расходу сливных трубок или по конструктивным соображениям. Скорость движения воды принимают в магистральных лотках 0,8 м/с и распределительных – до 0,4 м/с.

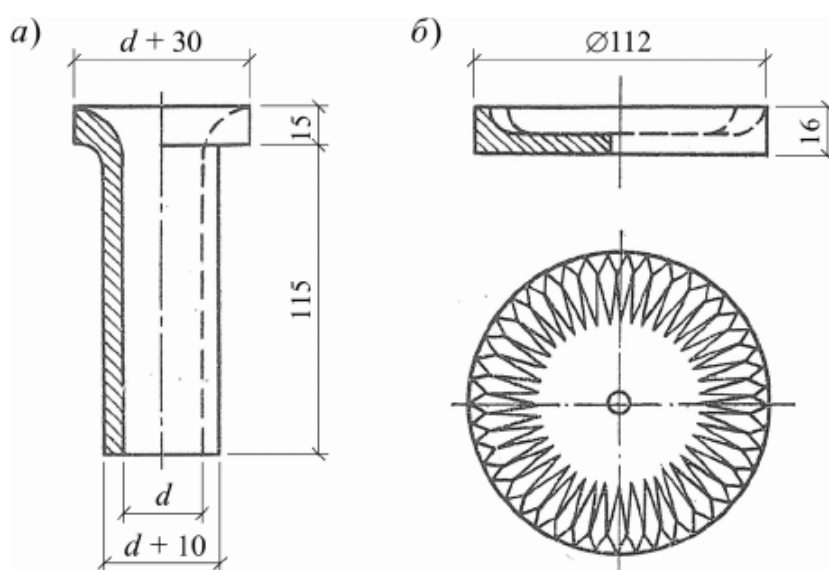


Рис. 3.13. Насадок (а) и тарелочка (б) для безнапорных систем водораспределения градирен

С целью интенсификации процесса охлаждения иногда применяют дифференцированное распределение воды с уменьшением плотности дождя к центру, что достигается применением гидравлических насадок или сопел различных диаметров либо изменением расстояния между ними. Расстояние между тарелочками или соплами определяется из условия равномерного дождя. Для проведения трудоемких гидравлических расчетов совместного действия разбрызгивающих устройств существуют программы расчета на ЭВМ.

В отечественной и зарубежной практике уделяется большое внимание распределительным системам без разбрызгивания воды. Распределение воды без разбрызгивания осуществляется благодаря пуску ее через треугольные лотки с боковыми отверстиями, фильтрации через слой пористого материала, пропуску воды через щели с регулируемой шириной и др. Эти системы эффективно работают в условиях дефицита свежей воды.

Оросители являются основным элементом градирни, определяющим ее охлаждающую способность. Конструкция оросителя должна обеспечивать получение достаточной площади поверхности охлаждения при оптимальном аэродинамическом сопротивлении. В зависимости от характера преобладающей поверхности охлаждения оросители могут быть: пленочные, капельные, капельно-пленочные и брызгальные. Каждый тип оросителя может иметь разнообразные конструкции отдельных элементов и размеры, а также выполняться из различных материалов. Выбор типа оросительного устройства производится на основании сопоставления охлаждающей способности и стоимости градирни. Необходимо учитывать долговечность, изнашиваемость материала, прочность и массу оросителя, легкость установки, доступность ремонта, а также наличие в охлаждаемой воде взвешенных веществ и агрессивность примесей. В зависимости от вида оросителя теплоотдача происходит с поверхности водяной пленки или с поверхности капли.

Деревянные оросительные устройства пленочного типа (рис. 3.14) выполняются из прямоугольных брусков толщиной 8–13 мм и шириной до 100 мм. Из них изготавливают щиты высотой 1,2–2,6 м и шириной 2,5 м за счет

крепления досок к двум-трем вертикальным рейкам с промежутками в 40–150 мм. Щиты собираются в блоки. Расстояния между щитами блочного деревянного оросителя 20–80 мм. Блоки по высоте устанавливаются в один или два яруса на горизонтальные опорные балки каркаса оросителя или подвешиваются к ним на стальных тросах. Однако древесина чувствительна к химическому и биологическому воздействию.

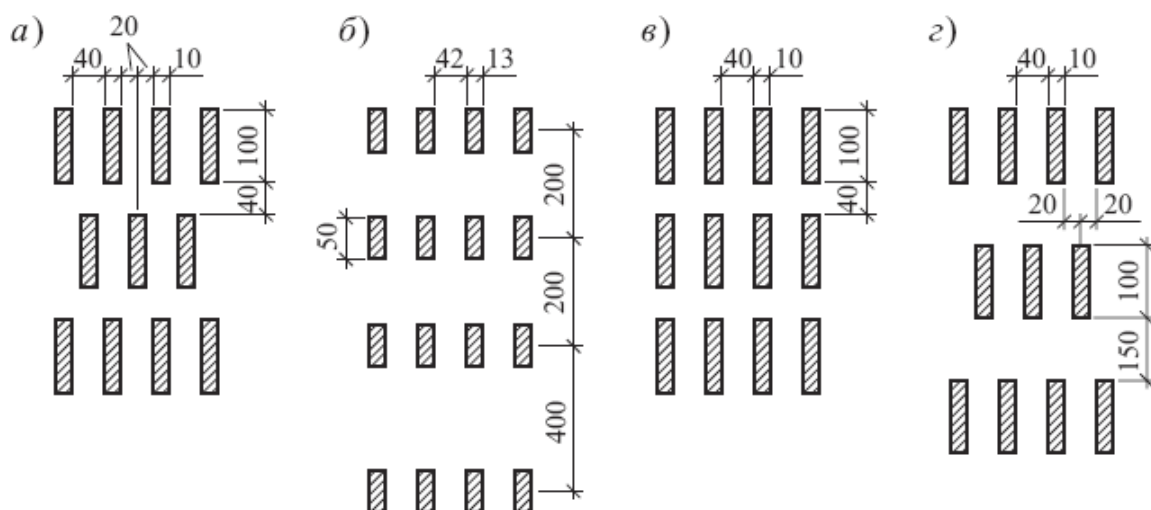


Рис. 3.14. Пленочные оросители из деревянных брусков

Асбестоцементные оросители изготавливаются из плоских и волнистых листов. Они обеспечивают хорошее растекание пленки воды, что улучшает охлаждающий эффект оросителя. Применяется блочная конструкция оросителя. Недостатком асбестоцементных оросителей является большая масса, канцерогенные свойства материала и склонность к зарастанию поверхности листов солями карбоната кальция.

Пластмассовые оросительные устройства являются одним из наиболее прогрессивных и распространенных типов. Пластмасса противостоит химическому воздействию многих растворов, кислот, солей и щелочей, что выгодно ее отличает от древесины. Эти оросители изготавливаются в виде сот, ячеек, волнистых листов и т.п.

Капельные оросители конструктивно представляют собой объемную решетку из планок и реек. Материалом для их изготовления может служить

древесина хвойных пород. В настоящее время древесина вытеснена синтетическими материалами, что привело к видоизменению конструкции оросителя.

Капельно-пленочные оросители, выполненные из дерева, состоят из двух и более частей, располагаемых друг над другом. По своей конструкции капельная и пленочная части такого оросителя не отличаются от обычных капельных и пленочных. Конструкции капельно-пленочных оросителей из полимерных материалов могут быть аналогичными деревянным. Однако более перспективными являются конструкции, выполненные из пластмассовых сеток, сформированных в виде призм, гофролистов и др. По возможности работать на загрязненной воде капельно-пленочные оросители, выполненные из сетчатых элементов, имея высоту около 1 м, не уступают капельным деревянным высотой 2–3 м. При реконструкции градирен могут применяться и комбинированные капельно-пленочные оросители. Например, из асбестоцементных листов в нижнем ярусе и полимерных сеток или листов различных видов в верхнем.

Брызгальные оросители – это оросительные устройства, заполненные воздухом направляющими щитами, предназначенными для улучшения распределения воздушного потока. Щиты выполняются из досок, волнистых асбестолистов или листового стеклопластика (рис. 3.15). Охлаждающая способность этих оросителей примерно на 20 % ниже капельных при таком же расходе материала (дерева). Это обуславливает целесообразность применения градирен с такими оросителями только при невысоких требованиях к температуре охлажденной воды, содержащей большое количество механических загрязнений или веществ, способных образовывать трудноудаляемые отложения на элементах капельного и пленочного оросителя.

Плотность орошения для капельных оросителей башенных градирен обычно принимается равной не менее $0,8 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, для пленочных – $1,4 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Для вентиляторных градирен плотность орошения ориентировочно

может быть принята: при пленочном оросителе – 2,2–3,3 кг/(м²·с), капельном оросителе – 1,7–2,2 кг/(м²·с) и брызгальном – 1,4–1,7 кг/(м²·с).

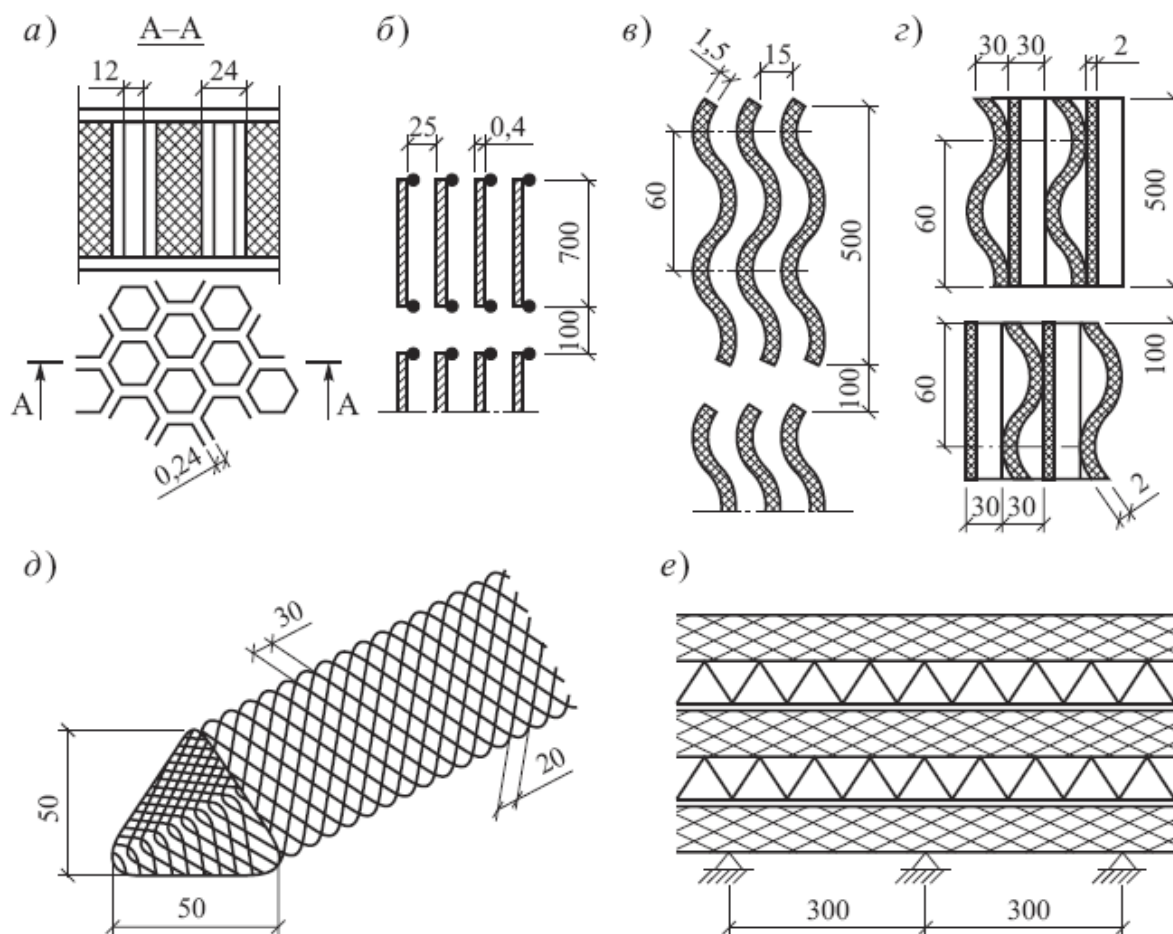


Рис. 3.15. Пленочные оросители из пластмасс:

а – сотовый; б – из перфорированного листа; в – из гофрированного листа; г – из волнистого листа; д – призма решетчатая; е – схема расположения призм в оросителе и водоуловителе градири.

Водоуловительные установки. Вынос капель из градирен вызывает потери воды в системах водоснабжения промышленных предприятий. На некоторых предприятиях вынос недопустим по санитарным соображениям и для охраны окружающей среды. Учитывая, что размеры, мощность и число градирен на промышленных площадках непрерывно возрастают, количество уносимой из них воды весьма велико. С целью уменьшения ее выноса над

водораспределителями градирен устанавливают водоуловители, что позволяет снизить вынос воды из градирни до 0,05–0,2% расхода оборотной воды.

Все известные конструкции водоуловителей работают по одному принципу – осаждение летящих вверх капель воды на препятствии за счет инерции при отклонении воздушного потока для огибания этого препятствия. В качестве препятствия используются деревянные, асбестоцементные или пластмассовые дощечки, планки, лопатки, соты (каналы) различной конфигурации, располагаемые в 1–3 ряда, а также волокна сеток. Различные типы водоуловителей отличаются друг от друга не только материалом, но и формой указанных элементов (препятствий) и их расположением.

Установка водоуловителей в некоторой степени увеличивает аэродинамическое сопротивление градирен, которое зависит от ряда факторов: степени заполнения живого сечения водоуловителя лопатками, наклона, формы, их взаимного расположения, материала. Наличие водоуловителя в градирне приводит к неравномерности распределения потока воздуха перед вентилятором, что может привести к снижению КПД вентиляторной установки.

Открытые градирни

Открытые градирни бывают двух типов: брызгальные и капельные. Их применяют в системах водоснабжения с расходом оборотной воды от 15 до 500 м³/ч, допускающих временное нарушение технологического процесса отдельных установок. Градирня представляет собой брызгальный бассейн, огражденный со всех сторон жалюзийными решетками, уменьшающими вынос воды за пределы бассейна (рис. 3.16). Решетки выполняют из досок под углом 45–60° к горизонту. Градирни открытого типа, как правило, имеют капельный ороситель. Брызгальные открытые градирни в настоящее время практически не применяются.

В капельной градирне имеется ороситель из деревянных реек. В открытых брызгальных градирнях оросительное пространство остается свободным от решетки для беспрепятственного падения капель в бассейн. Распределение воды по площади оросителя осуществляется напорной трубчатой системой с

водоразбрызгивающими соплами или безнапорной системой с применением желобов со сливными трубками и разбрызгивающими розетками. Водораспределительная система, как правило, выполняется двухзонной: верхняя – для летних условий эксплуатации и нижняя – для зимних. Водосборный бассейн открытых градирен выполняется под всем оросителем на ширину активной зоны. В плане градирни прямоугольной и квадратной формы с максимальной шириной не более 4 м и длиной 20 м. Общая высота может достигать 16 м, а число ярусов решетников – 8–12.

Область применения открытых градирен определяется следующими оптимальными условиями: удельная тепловая нагрузка 8–17 кВт/м²; плотность орошения 0,8–1,4 кг/(м²·с); перепад температур горячей и охлажденной воды 5–10 °С. Максимальная удельная тепловая нагрузка может составлять 35–60 кВт/м². С помощью этих градирен температуру охлажденной воды получают на 8–10 °С выше температуры по смоченному термометру.

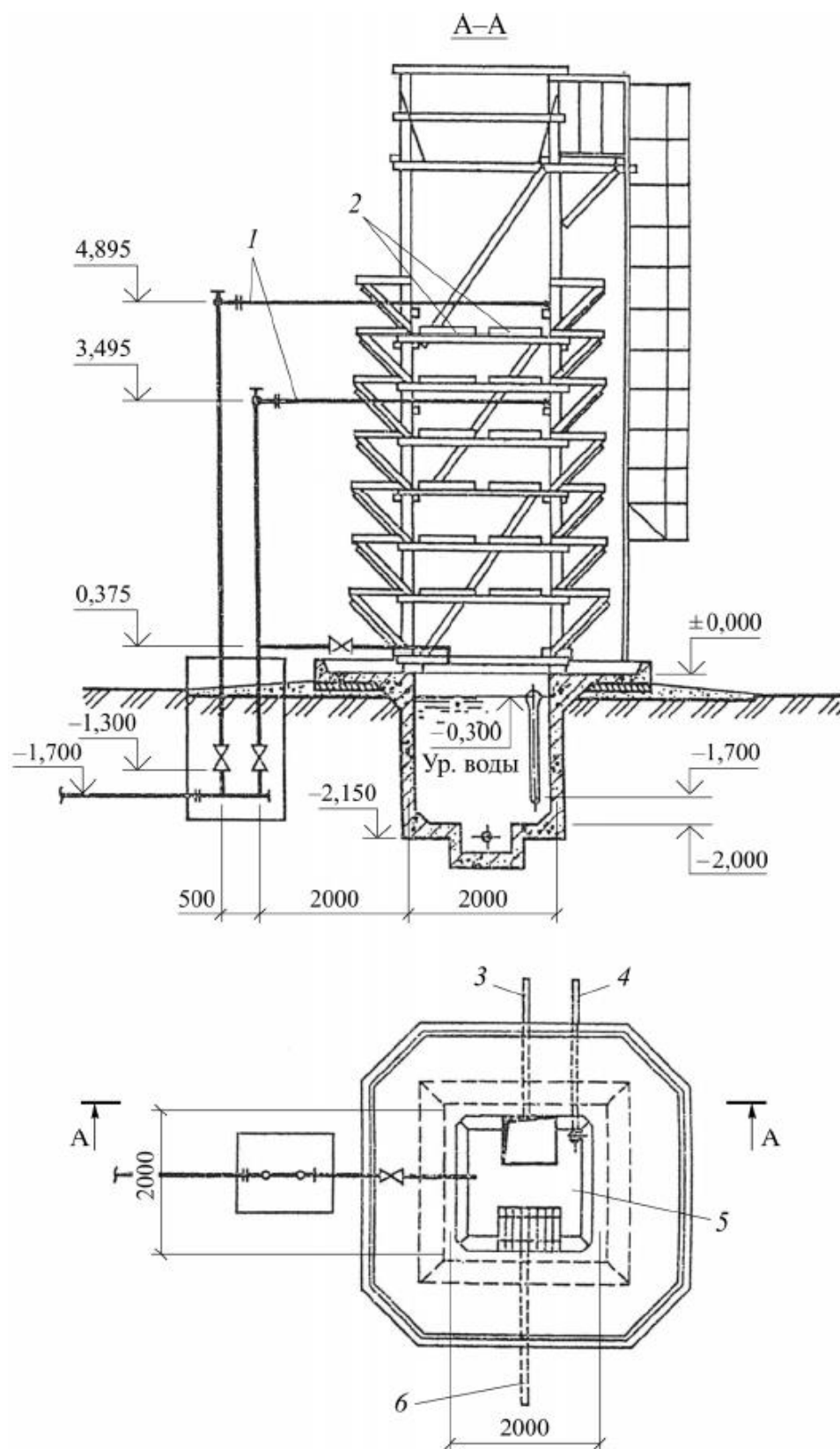


Рис. 3.16. Градирня открытого типа с капельным оросителем:

1 – водораспределительная система; 2 – ороситель из деревянных реек; 3 – грязевой трубопровод; 4 – переливной трубопровод; 5 – емкость для сбора охлаждающей воды; 6 – отводящий трубопровод

Башенные градирни. В башенных градирнях с естественной тягой движение воздуха возникает вследствие разности массы столбов наружного воздуха и нагретого и увлажненного воздуха внутри градирни (рис. 3.17). Оросительные устройства в этих градирнях выполняют капельного, капельно-пленочного или пленочного типа.

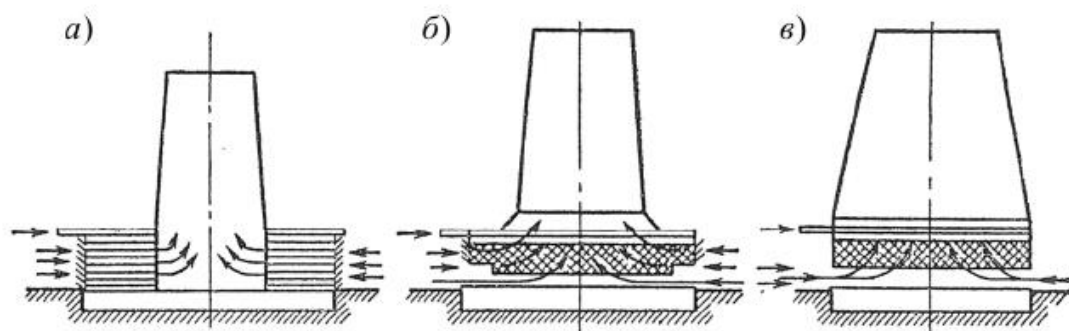


Рис. 3.17. Схемы башенных градирен с различным характером движения воздуха:
а – с поперечным; б – с поперечно-противоточным; в – с противоточным

В основном строят градирни с пленочными и капельно-пленочными оросителями с противоточным движением воздуха, обладающие наибольшей охлаждающей способностью (рис. 3.18). Наиболее сложным элементом башенной градирни является вытяжная башня, конструкция которой в основном определяется материалом, из которого ее сооружают. Вытяжные башни работают в очень тяжелых условиях: оболочка башен находится под воздействием влажного теплого воздуха в градирне и холодного воздуха снаружи в зимний период, на внутренних поверхностях образуется конденсат. Таким образом, важен выбор материала.

Опыт применения железобетона в градирнях показывает, что оболочки башен вследствие насыщения бетона изнутри влагой и многократного замерзания и оттаивания его под влиянием температур наружного воздуха в зимний период интенсивно разрушаются.

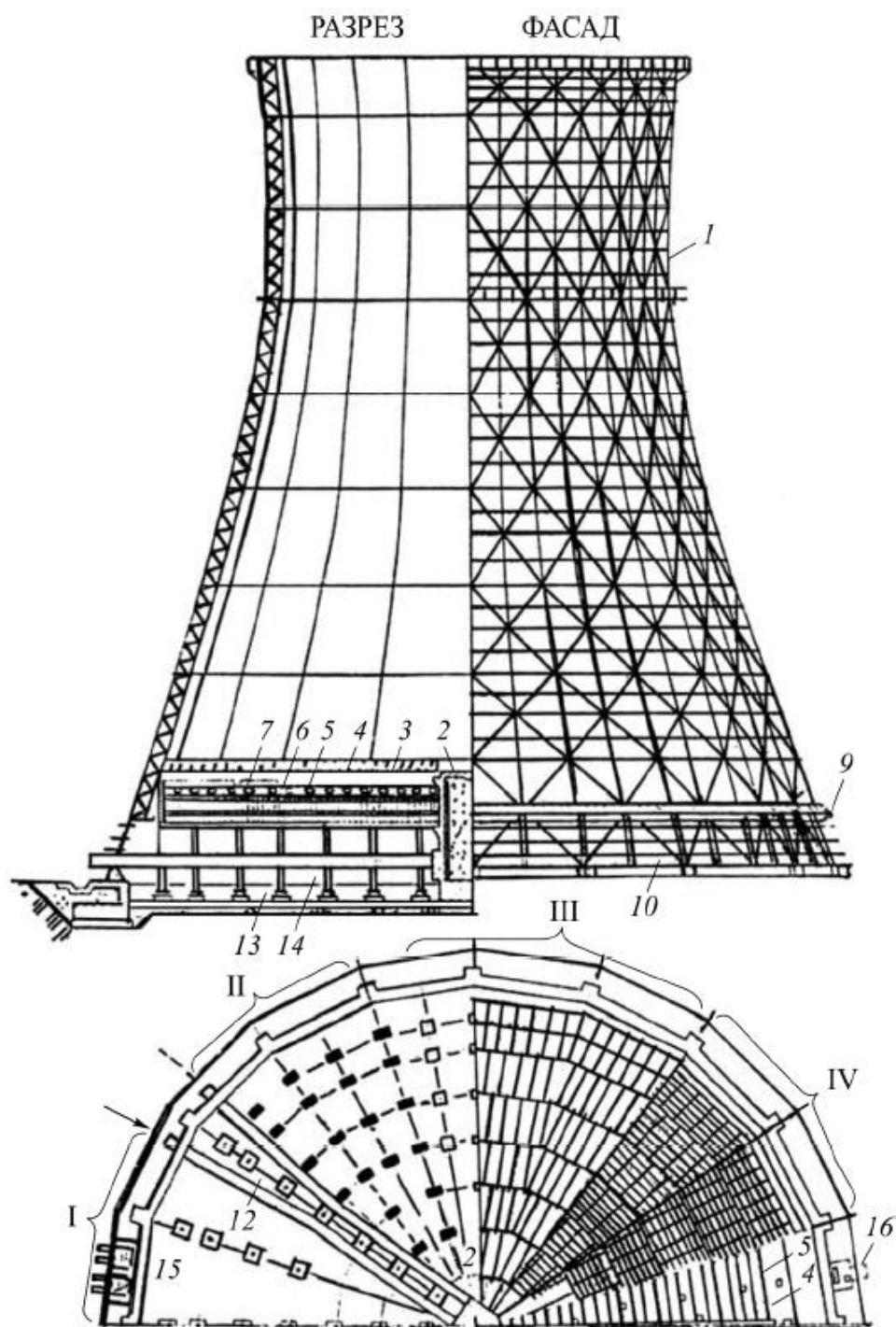


Рис. 3.18. Башенная противоточная градирня:

1 – вытяжная башня; 2 – водораспределительный стояк; 3 – водоуловитель; 4 – водораспределительная система; 5 – разбрызгивающие сопла; 6 – оросительное устройство; 7 – опорный каркас оросительного и водораспределительного устройства; 8 – воздуховодные окна; 9 – воздухонаправляющий козырек; 10 – поворотные щиты для изменения количества поступающего воздуха в градирню; 11 – воздухораспределительное пространство; 12 – ветровые перегородки; 13 – водосборный бассейн; 14 – подводящие водоводы; 15 – отводящие водоводы; 16 – канализационный колодец; I – фундаменты колонн

опорного каркаса; II – колонны опорного каркаса; III – балочная клетка под ороситель; IV – щиты оросителя

Металлические каркасно-обшивочные башни строят в районах с суровым зимним климатом. Они имеют пирамидальную форму с основанием в виде многоугольника или квадрата. Деревянный каркас используют в градирнях, имеющих небольшую площадь. Обшивка градирен должна быть плотной, не допускающей подсасывания наружного воздуха. Ее выполняют изнутри асбоцементными, пластмассовыми листами, деревом и иногда алюминием.

Подвод воздуха к оросителю в башенной градирне производится через входные окна по периметру градирни. Равномерность распределения воздуха оказывает большое влияние на охлаждающую способность градирни, что во многом зависит от размера окон. Их суммарная площадь принимается равной 35–45% площади градирни в плане. Для улучшения аэродинамических характеристик градирни над входными окнами устанавливается воздухонаправляющий козырек по всему ее периметру. Окна оборудуются поворотными и навесными щитами, позволяющими менять режим поступления воздуха в градирню с целью поддержания требуемого температурного режима.

Башенные градирни допускают более высокие тепловые нагрузки, чем открытые градирни. Область применения башенных градирен характеризуется следующими параметрами: удельная тепловая нагрузка – от 70 до 90 кВт/м²; перепад температур горячей и охлажденной воды – 5–15 °С; разность температуры охлажденной воды и температуры атмосферного воздуха по смоченному термометру – 6–8 °С, т.е. меньше, чем у открытых градирен. Таким образом, охлаждение воды на этих градирнях происходит до более низких температур.

Типовыми проектами предусматриваются градирни с площадью орошения от 1200 до 3200 м² при гидравлической нагрузке от 400 до 6000 кг/с. Существуют градирни больших размеров, а соответственно и большей производительности. Определение технологических параметров градирен

осуществляется аэродинамическим, термическим и гидравлическим расчетами. Все расчеты выполняются как для вновь проектируемых градирен, так и при привязке их типовых проектов к местным условиям строительства. При проектировании новых градирен предварительно выбирают тип и конструкцию градирни, основные размеры входных окон, воздухораспределителя, оросителя, водораспределителя и других элементов. При выборе типовых градирен эти параметры заданы.

Вентиляторные градирни (рис. 3.19) применяют в системах оборотного водоснабжения, требующих устойчивого и глубокого охлаждения воды, при необходимости маневренного регулирования температуры охлажденной воды, автоматизации поддержания заданной температуры охлажденной воды или охлаждаемого продукта, а также при необходимости сокращения объемов строительных работ.

Сооружение вентиляторных градирен дешевле башенных на 50–80% и брызгальных бассейнов на 30–50%. В сравнении с башенными градирнями они работают при низких напорах воды, однако для привода вентиляторов необходим значительный расход электроэнергии, а сами вентиляторы и их приводы нуждаются в постоянном уходе и ремонте.

По способу подачи воздуха в ороситель вентиляторные градирни бывают двух типов: нагнетательные и отсасывающие (см. рис. 3.19). При верхнем расположении вентиляторы отсасывают воздух из градирни, при нижнем – нагнетают. Для градирен используются специальные осевые отсасывающие или нагнетательные вентиляторы. Преимущественное распространение получили градирни с отсасывающими вентиляторами. При отсасывающих вентиляторах обеспечивается более равномерное распределение воздуха по поперечному сечению в основании градирни, чем при нагнетательных, происходит меньший подсос влажного теплого воздуха, попадающего в градирню через входные окна. Нагнетательные вентиляторы применяют для градирен с малой площадью орошения.

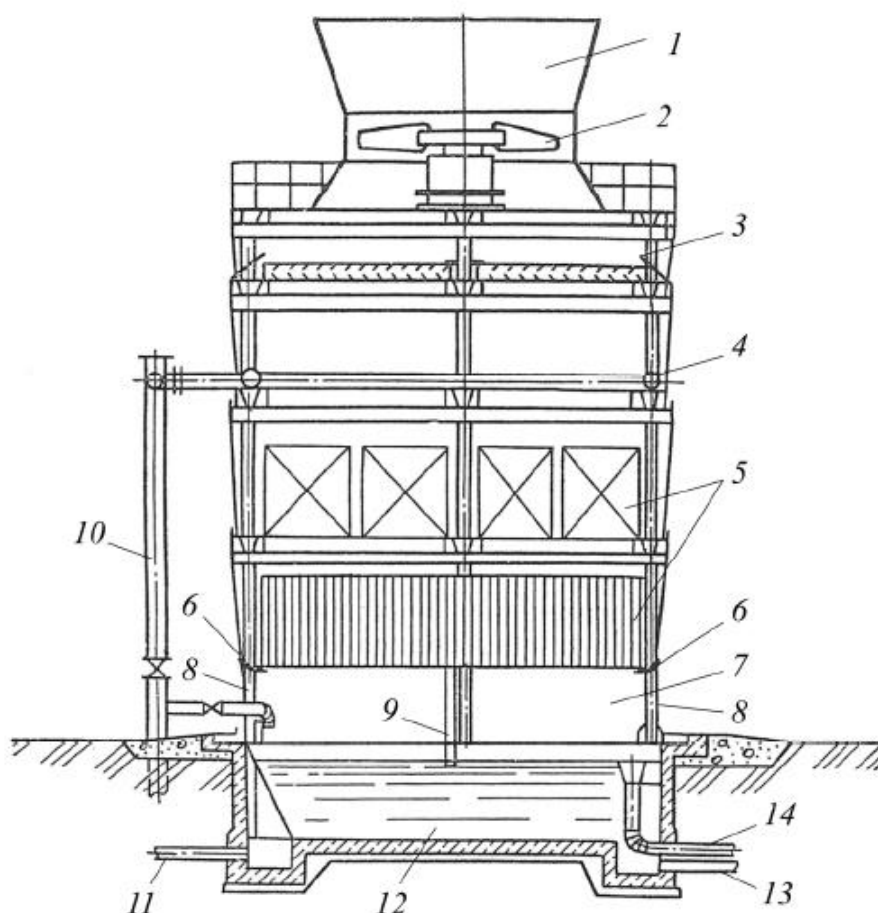


Рис. 3.19. Схема вентиляторной градирни с отсасывающим вентилятором:

1 – выхлопной патрубок; 2 – вентилятор; 3 – водоуловитель; 4 – водораспределительное устройство; 5 – оросительное устройство; 6 – воздухонаправляющий козырек; 7 – воздухораспределительное пространство; 8 – воздухоходные окна; 9 – ветровая перегородка; 10 – подводящий водопровод; 11 – отводящий водопровод; 12 – водосборный бассейн; 13 – грязевой водовод; 14 – переливной водовод

Для охлаждения оборотной воды в количестве 100–10 000 м³/ч применяют многосекционные отсасывающие градирни с секциями площадью до 200 м² каждая квадратной или прямоугольной формы в плане. При охлаждении оборотной воды в количествах более 10 000 м³/ч применяются отсасывающие градирни площадью орошения 400 м² и более, круглые, квадратные, многоугольные в плане одновентиляторные и секционные.

Каркас градирен может быть стальным или железобетонным. Для обшивки градирен применяют дерево, асбестоцементные листы, стеклопластик. В градирнях применяют пленочный, капельно-пленочный, капельный и

брызгальный оросители с противоточным движением воздуха в них. В южных районах, где нет опасности обмерзания градирен, возможно применение отсасывающих градирен с поперечным движением воздуха в оросителе. Суммарное аэродинамическое сопротивление поперечноточных градирен ниже, чем у противоточных. Капитальные затраты при их строительстве сокращаются.

Область применения вентиляторных отсасывающих градирен определяется следующими параметрами: удельная тепловая нагрузка – 90–120 кВт/м²; перепад температуры воды – до 25 °С и выше; разность температур охлажденной воды и температуры атмосферного воздуха по смоченному термометру – 4–5 °С. Приведенные данные указывают на то, что вентиляторные градирни могут охлаждать воду до более низких температур, чем башенные градирни, и тем более чем брызгальные бассейны и водохранилища-охладители (при равных условиях). Таким образом, для достижения одинакового эффекта охлаждения вентиляторные градирни требуют меньшей площади застройки по сравнению с другими охладителями воды. Однако вентиляторные градирни имеют один существенный недостаток, который иногда ограничивает их применение: для привода вентиляторов требуется электроэнергия, что приводит к увеличению эксплуатационных расходов.

Для охлаждения воды в количестве от 10 до 800 м³/ч для потребителей, находящихся внутри зданий, применяют нагнетательные вентиляторные градирни с противоточным и поперечным движением воздуха, которые размещают на плоской кровле. Оросители в этих градирнях капельного и пленочного типа выполнены из дерева или пластмассы; каркас градирен из стали или алюминий-магниевого сплава с асбестоцементной облицовкой. Градирня имеет поддон для сбора охлажденной воды слоем 100–150 мм. Необходимый аварийный запас воды хранится в резервуаре, установленном в здании или вне его. Градирни допускают плотность орошения от 1,1 до 3,3 кг/(м²·с) в зависимости от требований к температуре охлажденной воды.

Тепловой расчет вентиляторных градирен проводится по той же методике, что и расчет башенных градирен. При выборе типовых решений градирен пользуются графиками охлаждения, составленными на основе результатов обследований действующих градирен.

Сухие (радиаторные) градирни с момента изобретения предназначены для охлаждения конденсаторов электростанций. Они представляют собой теплообменные сооружения, в которых теплопередающей поверхностью служат радиаторы из оребренных трубок. Для создания тяги такие градирни могут быть оборудованы вентиляторами или вытяжной башней. Сухие градирни применяются как для непосредственного охлаждения продуктов производства, например конденсации, так и для охлаждения воды, охлаждающей, в свою очередь, теплообменные аппараты.

Передача тепла от нагретой среды, протекающей внутри трубок радиатора, атмосферному воздуху осуществляется без непосредственного контакта через сильно развитую поверхность ребер, имеющих на трубках, за счет теплопроводности и конвекции. Для интенсификации процессов теплопередачи ребристые трубы могут орошаться снаружи водой. Радиаторы изготавливаются самых разнообразных конструкций, главным образом из стали или алюминия.

Сухие градирни применяются в случаях:

- необходимости иметь закрытый, изолированный от контакта с атмосферным воздухом контур циркуляции воды в системе оборотного водоснабжения;
- высоких температур нагрева оборотной воды в теплообменных технологических аппаратах, не допускающих ее охлаждения в градирнях испарительного типа;
- отсутствия или серьезных затруднений в получении свежей воды на пополнение безвозвратных потерь в оборотных циклах.

Сухие градирни не имеют широкого распространения в сравнении с испарительными градирнями из-за их высокой стоимости, небольшой производительности и большого расхода электроэнергии. В теплое время года

температура охлажденной воды значительно выше, чем в испарительных градирнях, и бывает на 15–20 °С выше температуры воздуха. Зимой вода охлаждается до более низких температур и составляет 5–6 °С.

Гибридная градирня – это комбинированное сооружение, в котором совмещены процессы теплообмена, присущие испарительной и сухой градирням. Тяга воздуха может создаваться вытяжной башней, вентилятором или совместно башней и несколькими вентиляторами, размещенными по периметру башни в ее нижней части.

Технологические и технико-экономические показатели гибридных градирен лучше в сравнении с сухими, но уступают испарительным. Они имеют меньше дорогостоящего теплообменного оборудования, и охлаждающая способность их в меньшей мере зависит от изменения температуры воздуха. К достоинствам гибридных градирен можно отнести заметное снижение безвозвратных потерь воды в сравнении с испарительными градирнями и возможность работы без видимого парового факела. В то же время гибридные градирни более сложны при проектировании и строительстве, требуют повышенного внимания и обслуживания при эксплуатации не только самих градирен, но и системы водооборота в целом. При недостаточно качественной оборотной воде на стенках внутри труб радиаторов образуются солевые отложения, а оребрения труб загрязняются пылью входящего воздуха, что приводит к резкому возрастанию теплового сопротивления. Это вызывает нарушение расчетных режимов работы сухой и испарительной частей, а также аварийные ситуации в зимнее время. В нашей стране гибридные градирни не получили распространения из-за повышенных требований при эксплуатации и большей стоимости в сравнении с обычными испарительными градирнями.

3.5. Водоочистные комплексы промышленного водоснабжения

3.5.1. Принципы компоновки водоочистных комплексов

Основополагающими при решении генплана водоочистного комплекса помимо географических, топографических и геологических условий являются его производительность и состав водоочистных сооружений. На генплане показывают блок основных водоочистных сооружений, служебный корпус, реагентное хозяйство, сооружения обработки промывных вод и осадка, емкости исходной и очищенной воды.

Компактное взаимное расположение отдельных водоочистных сооружений, вспомогательных помещений и оборудования на генплане комплекса должно предусматривать минимальные капиталовложения в строительство, обеспечивать максимальные удобства и экономичность эксплуатации, минимальную протяженность трубопроводов и дорожных покрытий между ними, удобство производства ремонтных работ, надежность и бесперебойность работы комплекса, возможность планомерного расширения при росте водопотребления.

Все основные и вспомогательные сооружения желательно располагать в виде единого комплекса, образуемого одноэтажным зданием. Для небольших станций водоподготовки компактность расположения водоочистных сооружений и оборудования достигается их размещением в одном здании.

На генплане должны быть показаны (с указанием диаметров): трубопроводы исходной и очищенной воды; трубопроводы подачи, отвода и оборота промывной воды; промышленная и хозяйственно-бытовая канализация, хозяйственно-противопожарный водопровод, отводной трубопровод, теплосеть, кабели и другие коммуникации.

На рис. 3.20 и 3.21 показаны примеры проектов станций подготовки воды для подпитки теплосетей, питания паровых котлов среднего и высокого давления с применением технологий обратного осмоса и ионного обмена для умягчения и обессоливания воды, а также с использованием технологий осветления и ультрафильтрации в качестве предочистки.

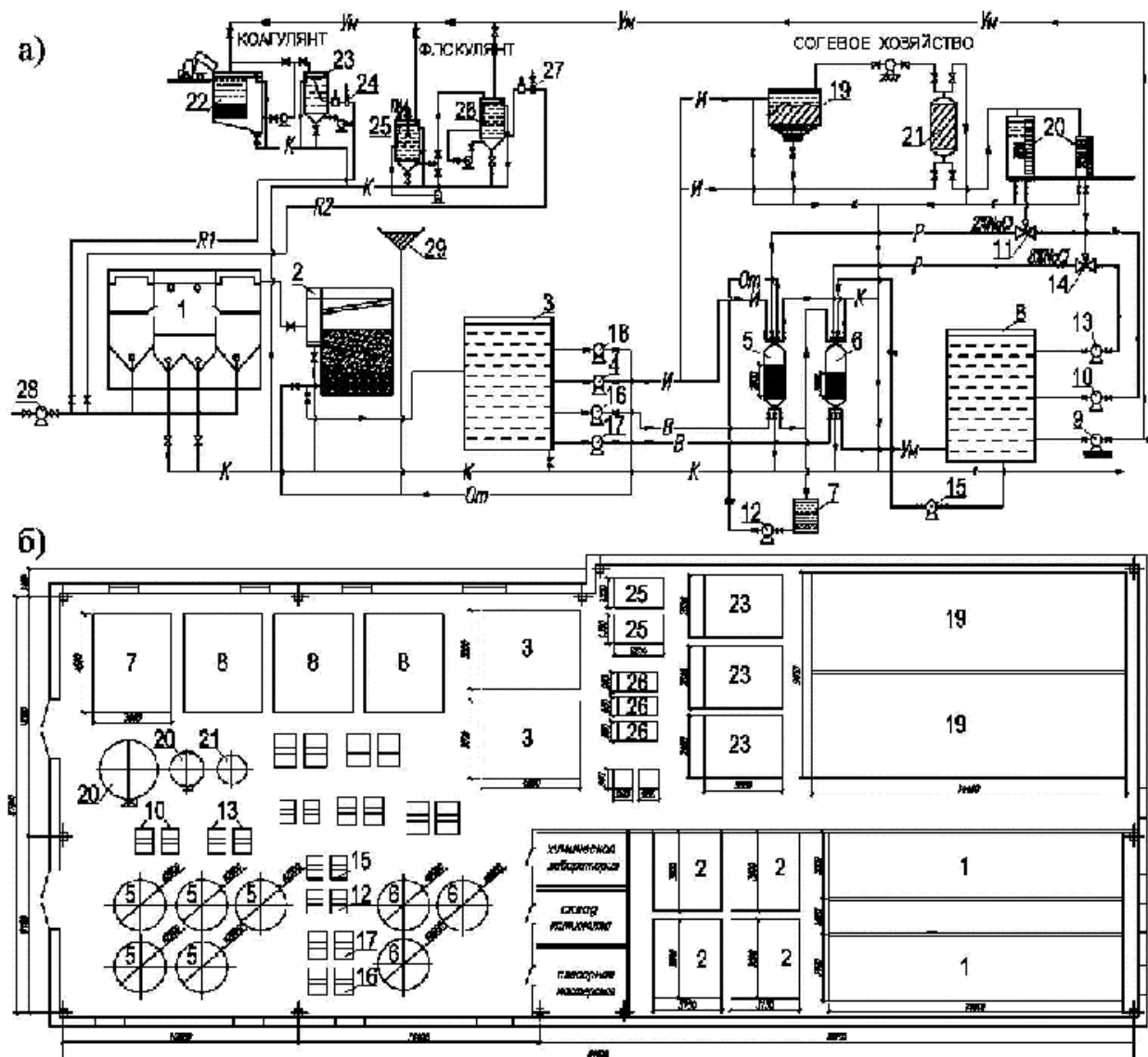


Рис. 3.20. Проект станции подготовки поверхностной воды для паровых котлов среднего давления производительностью $150 \text{ м}^3/\text{ч}$ (схема двухступенчатого Na -катионирования): а) высотная схема, б) компоновка оборудования.

Экспликация трубопроводов: И – исходная вода; Ум – умягчение; От – отмывка; R1 – раствор коагулянта; R2 – раствор флокулянта

1 – коридорный осветлитель со взвешенным осадком; 2 – открытый скорый фильтр; 3 – бак сбора осветленной воды; 4 – насос подачи воды в Na -катионитовый фильтр I ступени; 5 – Na -катионитовый фильтр I ступени; 6 – Na -катионитовый фильтр II ступени; 7 – бак фильтрата I ступени для отмывки фильтра I ступени; 8 – бак сбора умягченной воды; 9 – насос подачи умягченной воды; 10 – насос подачи регенерационного раствора в фильтр I ступени; 11 – эжектор подачи солевого раствора в фильтр I ступени; 12 – насос отмывки фильтра I ступени; 13 – насос подачи регенерационного раствора в фильтр II ступени; 14 – эжектор подачи солевого раствора в фильтр II ступени; 15 – насос отмывки фильтра II ступени; 16 – насос взрыхления фильтра I ступени; 17 – насос взрыхления фильтра II ступени; 18 – промывной насос скорых фильтров; 19 – бак мокрого хранения соли; 20 – расходный бак-мерник солевого раствора; 21 – фильтр очистки

солевого раствора; 22 – бак мокрого хранения коагулянта; 23 – расходный бак хранения коагулянта; 24 – дозатор раствора коагулянта; 25 – растворный бак ПАА; 26 – расходный бак ПАА; 27 – дозатор; 28 – насос подачи исходной воды; 29 – водонапорная башня промывной воды для скорых фильтров

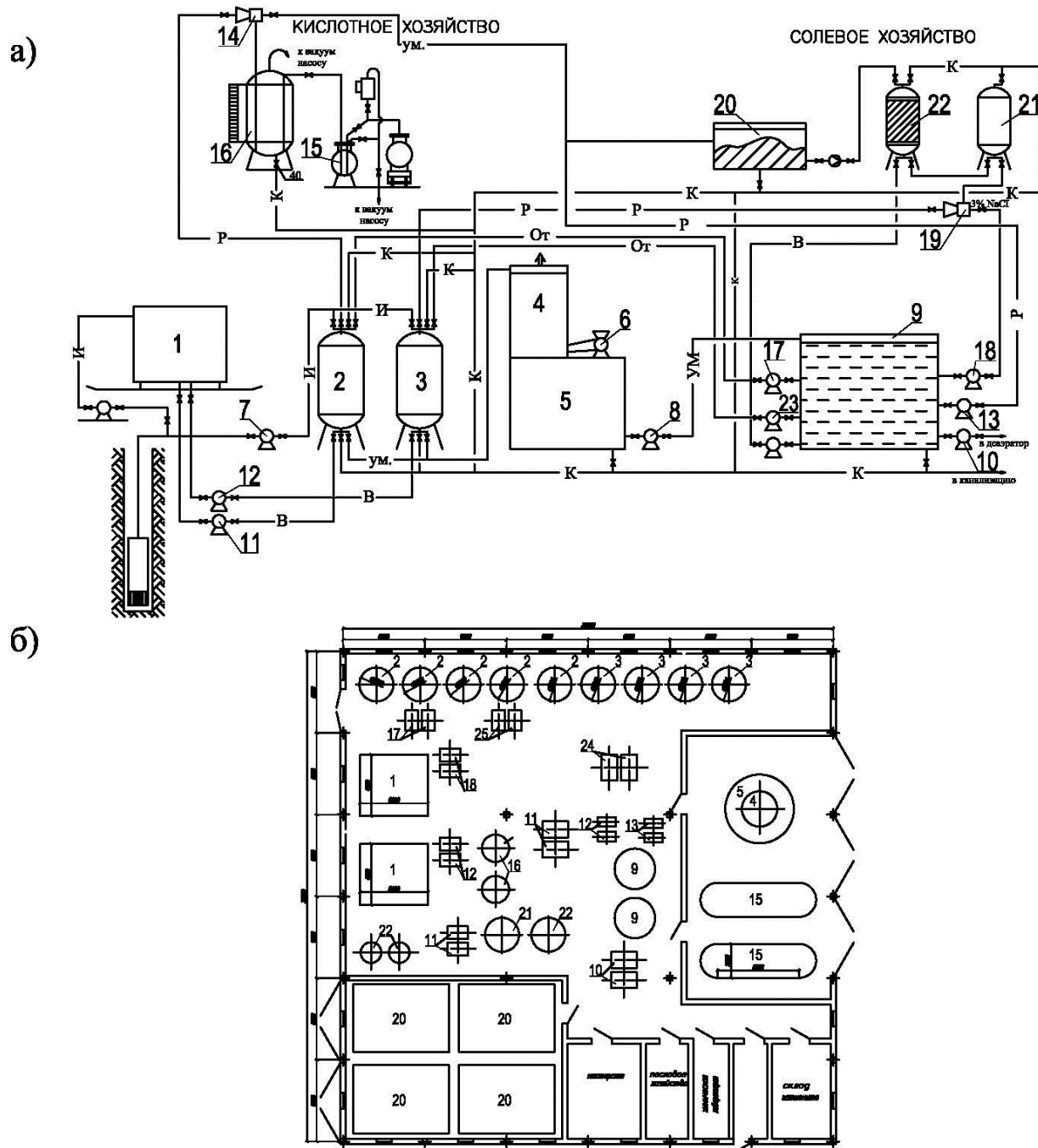


Рис. 3.21. Проект станции подготовки воды для подпитки теплосети производительностью 300 м³/ч (схема параллельного Н-На-катионирования): а) высотная схема; б) компоновка оборудования.

Экспликация трубопроводов: И – исходная вода; Р – регенерационный раствор; В – взрыхление; К – канализация; Ум – умягчение; От – отмывка

1 – бак исходной воды; 2 – Н-катионитовый фильтр; 3 – На-катионитовый фильтр; 4 – дегазатор; 5 – бак сбора умягченной воды после дегазатора; 6 – вентилятор; 7 – насос подачи воды на

установку; 8 – насос подачи умягченной воды в бак; 9 – бак хранения умягченной воды; 10 – насос подачи воды в деаэрактор; 11 – насос взрыхления Н-катионитового фильтра; 12 – насос взрыхления Na-катионитового фильтра; 13 – насос подачи регенерационного раствора в Н-катионитовый фильтр; 14 – эжектор подачи кислоты; 15 – цистерна с кислотой; 16 – мерник кислоты; 17 – насос отмычки Н-катионитового фильтра; 18 – насос подачи регенерационного раствора поваренной соли в Na-катионитовый фильтр; 19 – эжектор подачи соли; 20 – бак мокрого хранения соли; 21 – расходный бак раствора соли; 22 – фильтр очистки солевого раствора; 23 – насос отмычки Na-катионитового фильтра

Для современных паровых котлов с высокой температурой напряженностью требуется вода не только глубоко умягченная (с величиной жесткости не выше 0,05 мг-экв/л), но и частично обессоленная вода (с солесодержанием не выше 80 мг/л). На рис. 3.22 показан проект станции водоподготовки, основанной на частичном обессоливании воды методом ионного обмена производительностью 150 м³/ч. В здании в отдельном помещении находятся баки мокрого хранения коагулянта, оборудование предочистки – коридорные осветлители и скорые фильтры, насосы. В фильтровальном зале расположены ионообменные фильтры для Н-катионирования и ОН-анионирования, насосы, баки для обессоленной воды, дегазатор, баки осветленной воды.

В отдельных помещениях располагаются кислотное и щелочное хозяйства, в которых находятся цистерны для хранения запаса серной кислоты и едкого натра, а также мерники.

Для паровых котлов высокого давления, использующихся на ТЭЦ, требуется подготовка глубоко обессоленной воды. Для подготовки глубоко обессоленной воды используются трехступенчатая схема ионообменного обессоливания. На рис. 3.24 показан проект станции водоподготовки по схеме полного обессоливания производительностью 100 м³/ч. Технологической схемой предусмотрена предочистка поверхностной воды в осветлителях типа ЦНИИ-3 с известкованием с последующей очисткой на механических фильтрах. Станция предочистки располагается в отдельном помещении, где размещаются осветлитель, баки осветленной воды, насосное оборудование,

оборудование для дозирования реагентов (коагулянта, извести и флокулянта). В отдельном помещении находятся баки мокрого хранения коагулянта и известковое хозяйство.

В фильтровальном зале рядами расположены Н-катионитовые и ОН-анионитовые фильтры первой и второй ступеней, фильтры смешанного действия, дегазатор, промежуточные баки для сбора обессоленной воды после каждой ступени, насосное оборудование. Кислотное и щелочное хозяйства расположены в отдельных помещениях.

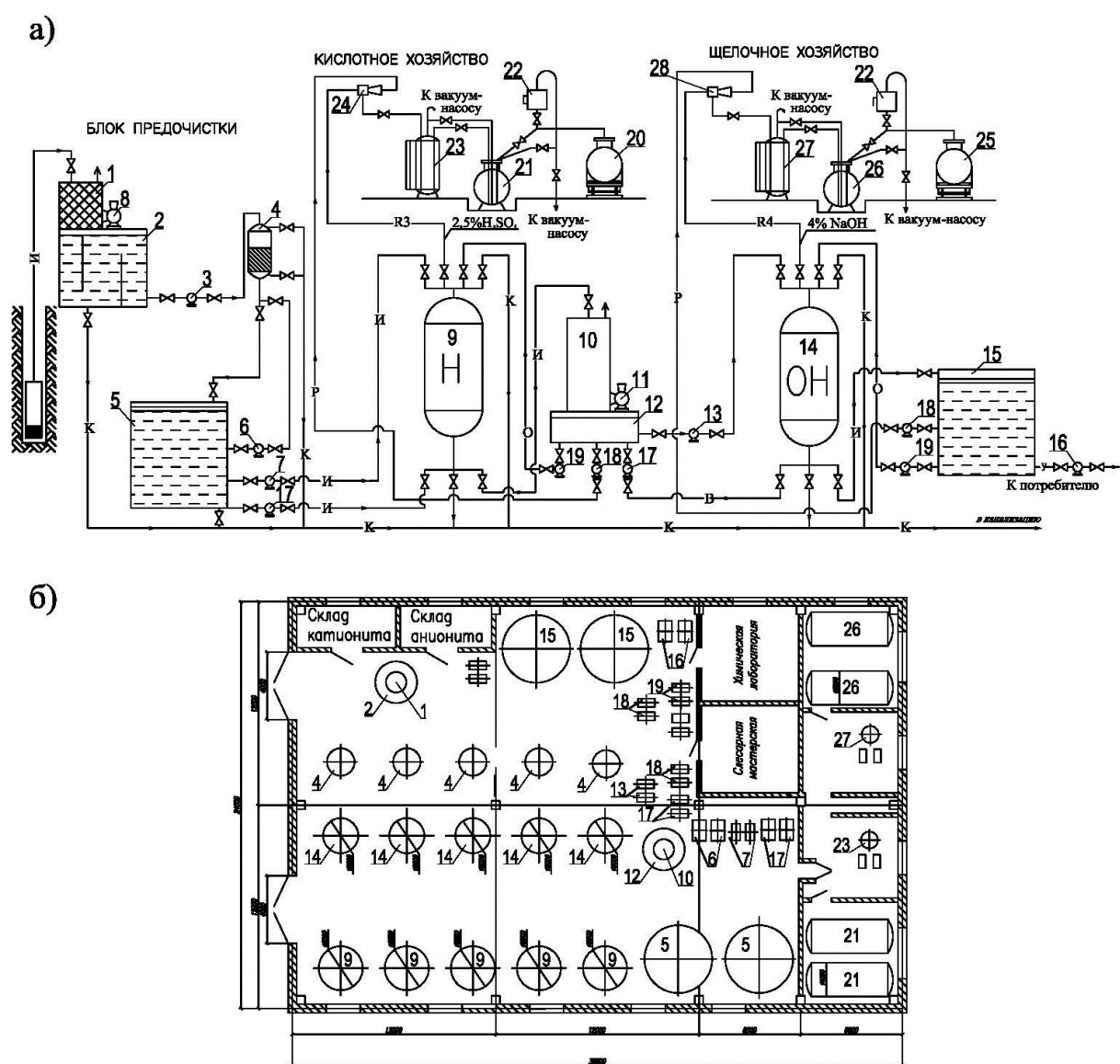


Рис. 3.23. Проект станции подготовки воды для паровых котлов с высокой температурной напряженностью (схема частичного обессоливания) производительностью $150 \text{ м}^3/\text{ч}$: а) высотная схема, б) компоновка оборудования. Эпсликация трубопроводов: И – исходная вода; Р –

регенерационный раствор; В – взрыхление; К – канализация; У – умягчение; От – отмывка; R3 – регенерация раствором кислоты; R4 – регенерация раствором щелочи.

1 – дегазатор для аэрации воды; 2 – бак дегазатора; 3 – насос подачи воды на фильтр обезжелезивания; 4 – напорный механический фильтр для обезжелезивания; 5 – бак сбора обезжелезенной воды; 6 – насос промывки фильтров обезжелезивания; 7 – насос подачи воды на Н-катионитовые фильтры; 8 – воздуходувка; 9 – Н-катионитовый фильтр; 10 – дегазатор; 11 – вентилятор; 12 – бак дегазатора; 13 – насос подачи воды на ОН-анионитовый фильтр; 14 – ОН-анионитовый фильтр; 15 – бак сбора обессоленной воды; 16 – насос подачи обессоленной воды в деаэрактор; 17 – насосы взрыхления; 18 – насосы подачи регенерационного раствора; 19 – насосы подачи воды на отмывку; 20 – ж/д цистерна с кислотой; 21 – цистерна хранения кислоты; 22 – промежуточный бак; 23 – бак-мерник с едким натром; 24 – эжектор кислоты; 25 – ж/д цистерна с едким натром; 26 – цистерна хранения щелочи; 27 – мерник щелочи; 28 – эжектор щелочи

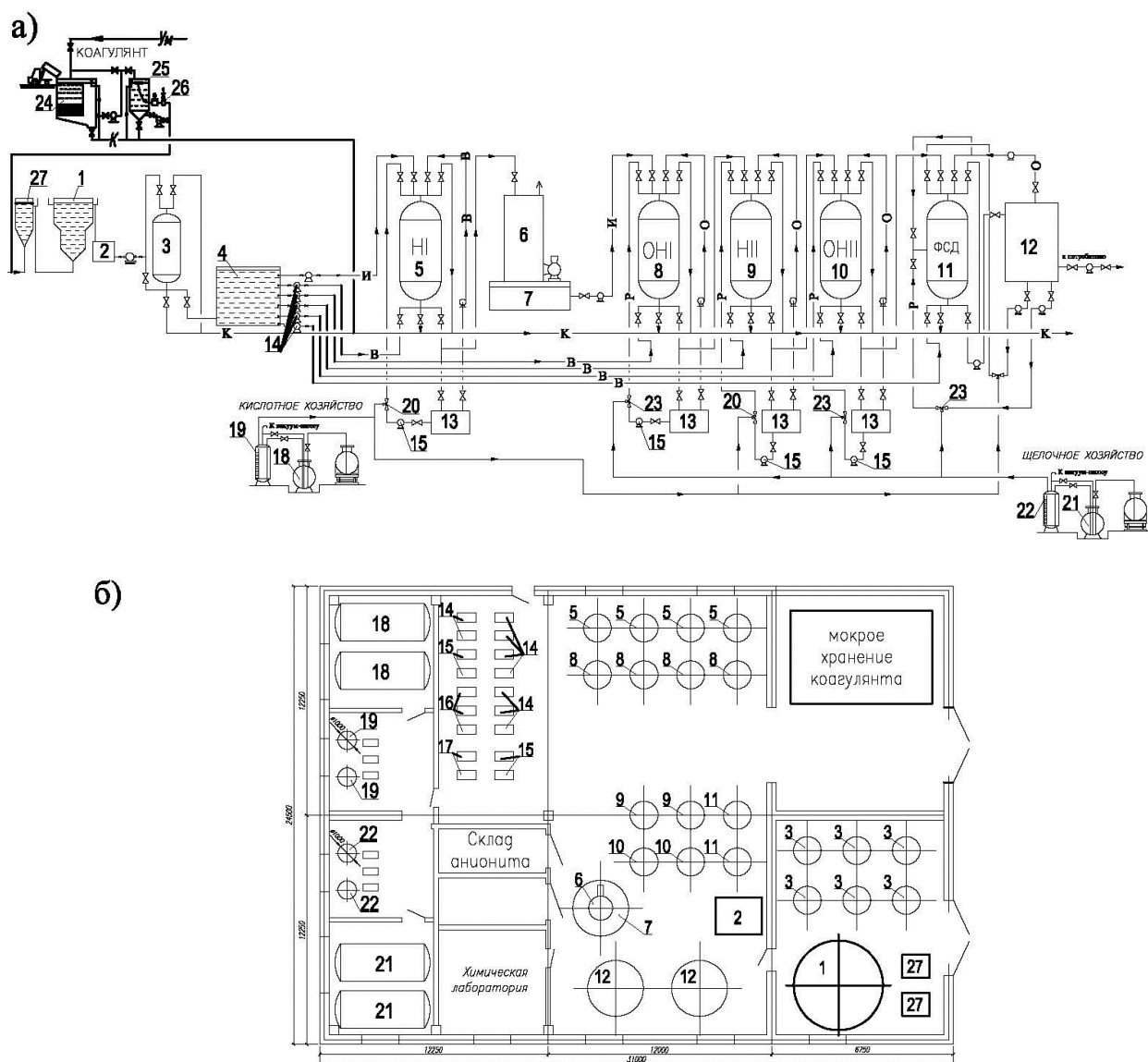


Рис. 3.24. Проект станции подготовки воды котлов высокого давления (схема полного обессоливания) производительностью 100 м³/ч: а) высотная схема; б) компоновка оборудования.

Экспликация трубопроводов: И – исходная вода; Р – регенерационный раствор; В – взрыхление; К – канализация; Ум – умягчение; О – отмывка

1 – осветлитель ЦНИИ-3; 2 – промежуточный бак осветленной воды; 3 – механический фильтр; 4 – бак сбора воды после механического фильтра; 5 – Н-катионитовый фильтр I ступени; 6 – дегазатор; 7 – бак сбора воды после дегазатора; 8 – ОН-анионитовый фильтр I ступени; 9 – Н-катионитовый фильтр II ступени; 10 – ОН-анионитовый фильтр II ступени; 11 – фильтр смешанного действия; 12 – бак сбора осветленной воды; 13 – баки для сбора воды для взрыхления, отмывки и регенерации; 14 – насосы взрыхления; 15 – насосы подачи регенерационного раствора; 16 – насосы отмывки; 17 – насосы обратной промывки механических фильтров; 18 – цистерна хранения кислоты; 19 – мерник кислоты; 20 – эжекторы подачи кислоты; 21 – цистерна хранения щелочи; 22 – мерник щелочи; 23 – эжекторы подачи щелочи; 24 – бак мокрого хранения коагулянта; 25 – расходный бак раствора коагулянта

Современные схемы обессоливания воды с применением технологии ионного обмена требуют больших расходов реагентов – кислот и щелочей. Образующиеся при регенерации ионитовых фильтров регенерационные растворы с высоким солесодержанием требуют мер по их утилизации. Современным подходом к созданию станций водоподготовки является использование мембранных технологий (обратного осмоса), благодаря чему обессоливание воды происходит без использования дорогостоящих реагентов. Пример проекта экологически чистой станции водоподготовки для ТЭЦ производительностью 100 м³/ч показан на рис. 3.25. Система предочистки поверхностной воды основана на применении систем ультрафильтрации. В фильтровальном зале расположены блоки с ультрафильтрационными мембранами, блоки с обратноосмотическими мембранами, насосы, Н-катионитовые и ОН-анионитовые фильтры, фильтры смешанного действия. Благодаря использованию установки обратного осмоса солесодержание исходной воды снижается в 90–100 раз, поэтому ионообменные фильтры используются только для дообессоливания, их габариты оказываются в 10 раз меньше, а затраты на регенерационные реагенты – в 100 раз меньше, чем в случае применения схемы полного ионообменного обессоливания (см. рис. 3.24). Использование мембранных установок (ультрафильтрации и обратного осмоса) позволяет значительно сократить габариты цеха химводоочистки.

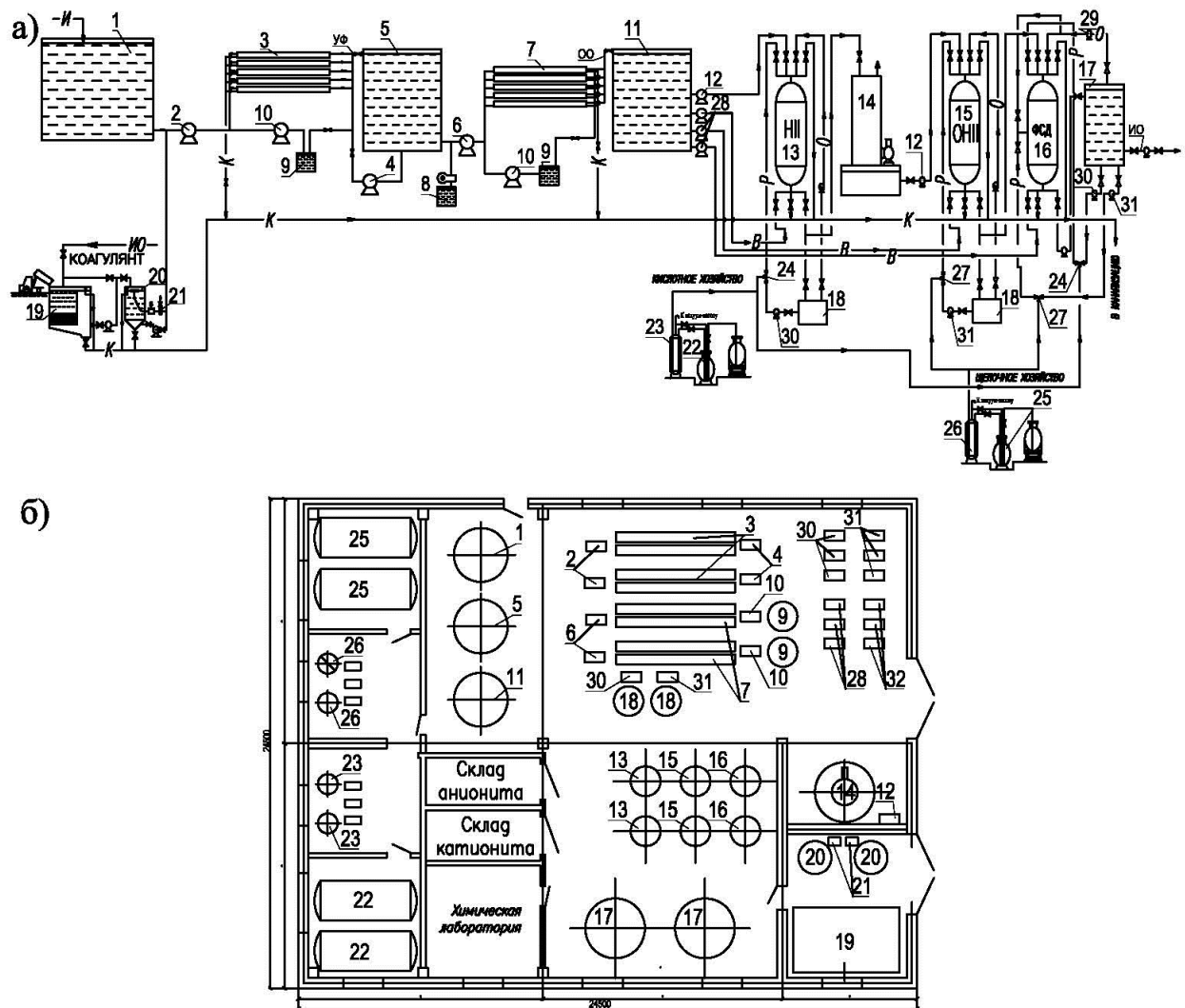


Рис. 3.25. Проект станции подготовки питательной воды котлов высокого давления (ТЭС) из поверхностного водоисточника с использованием современных мембранных технологий ультрафильтрации и обратного осмоса производительностью $100 \text{ м}^3/\text{ч}$: а) высотная схема; б) компоновка оборудования. Эekliкация трубопроводов: И – исходная вода; Р – регенерационный раствор; В – взрыхление; К – канализация; О – отмывка; УФ – осветленная вода после УФ-установки; ОО – обессоленная вода после установки обратного осмоса; ИО – обессоленная вода после ионообменных фильтров

1 – приемный резервуар исходной воды; 2 – насос подачи исходной воды на ультрафильтрационные блоки; 3 – блоки с ультрафильтрационными аппаратами; 4 – насос промывки ультрафильтрационных аппаратов; 5 – бак осветленной воды; 6 – рабочий насос обратноосмотической установки; 7 – обратноосмотические аппараты; 8 – блок дозирования ингибитора; 9 – бак промывки мембранных модулей; 10 – насос химической промывки мембранных модулей; 11 – бак сбора фильтрата обратноосмотической установки; 12 – насосы подачи воды на установку ионного обмена; 13 – Н-катионитовый фильтр II ступени; 14 – дегазатор; 15 – ОН-

анионитовый фильтр II ступени; 16 – фильтр смешанного действия; 17 – бак сбора обессоленной воды; 18 – бак для сбора воды для отмывки, воды для взрыхления и приготовления регенерационных растворов; 19 – резервуар мокрого хранения коагулянта; 20 – расходный бак раствора коагулянта; 21 – блок дозирования коагулянта; 22 – цистерна с кислотой; 23 – мерник кислоты; 24 – эжекторы подачи кислоты; 25 – цистерна со щелочью; 26 – мерник щелочи; 27 – эжектор подачи щелочи; 28 – насос взрыхления; 29 – насос отмывки; 30 – насос подачи регенерационного раствора кислоты; 31 – насос подачи регенерационного раствора щелочи; 32 – насос подачи воды на отмывку

На рис. 3.26 и 3.27 показаны технологическая схема и компоновка станции обработки охлаждающей воды. Проектом предусматриваются следующие виды обработки воды: подкисление серной кислотой, фосфатирование, хлорирование, купоросование. Кислота, раствор полифосфатов, медный купорос и хлорная вода подаются в резервуар охлажденной воды. Хлор-газ к хлораторам поступает из хлораторной, находящейся в отдельном помещении в здании. Хлорная вода, получаемая в результате непрерывной работы хлораторов, накапливается в баке и периодически выпускается в канал охлажденной воды. Серная кислота доставляется в автоцистернах, сливается в цистерны и хранится на складе. Гексаметафосфат или триполифосфат натрия, а также медный купорос доставляют автомашинами и хранят на специальном складе, расположенном рядом с дозаторной реагентов.

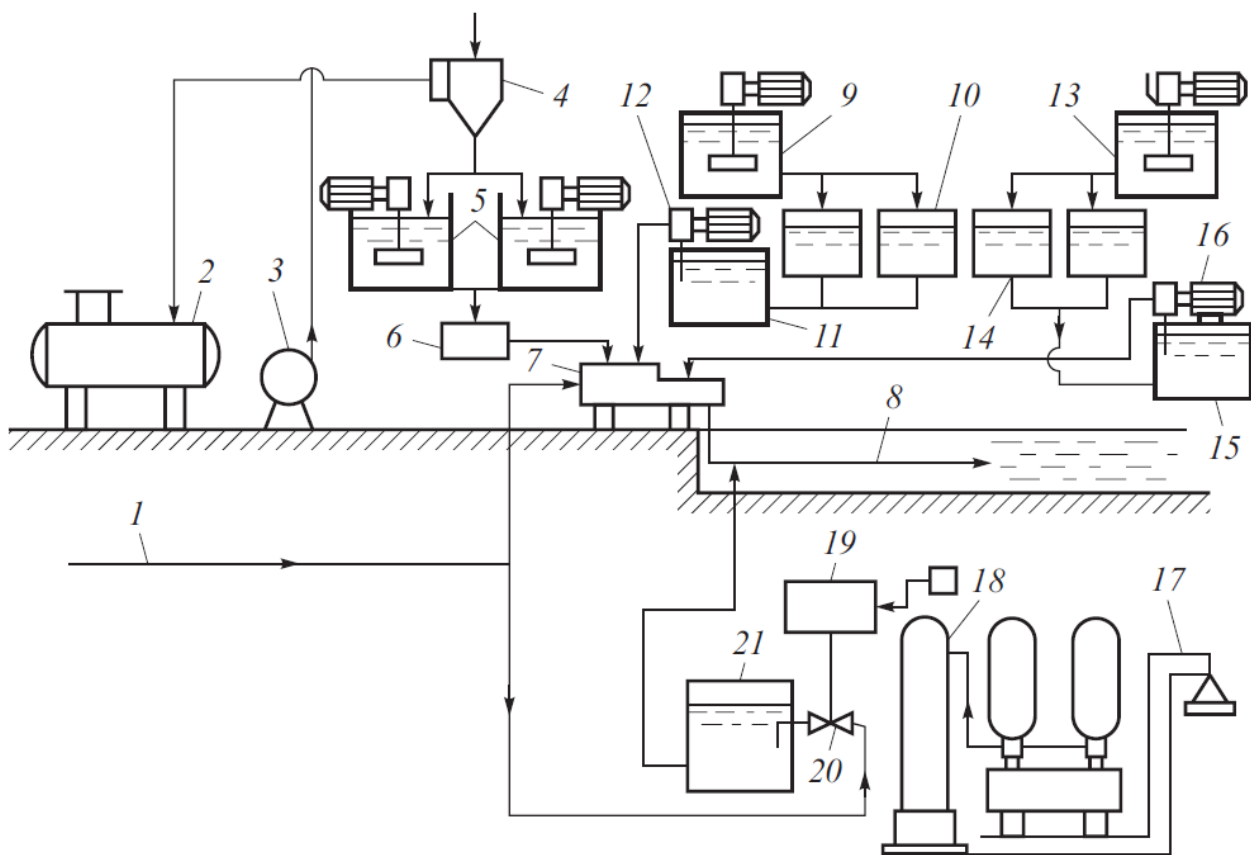


Рис. 3.26. Технологическая схема станции стабилизационной обработки оборотной воды:
 1 – трубопровод исходной воды; 2 – цистерна с кислотой; 3 – насос; 4 – мерный бак кислоты; 5 – растворный бак кислоты; 6 – дозатор кислого раствора; 7 – смеситель; 8 – резервуар и канал охлажденной воды; 9, 10, 11 – растворный, расходный и дозировочный баки фосфатного реагента; 12 – дозатор фосфатного реагента; 13, 14, 15 – растворный, расходный и дозировочный баки раствора медного купороса; 16 – дозатор раствора медного купороса; 17 – весы с баллонами жидкого хлора; 18 – промежуточный баллон; 19 – хлоратор; 20 – эжектор; 21 – бак для хлорной воды

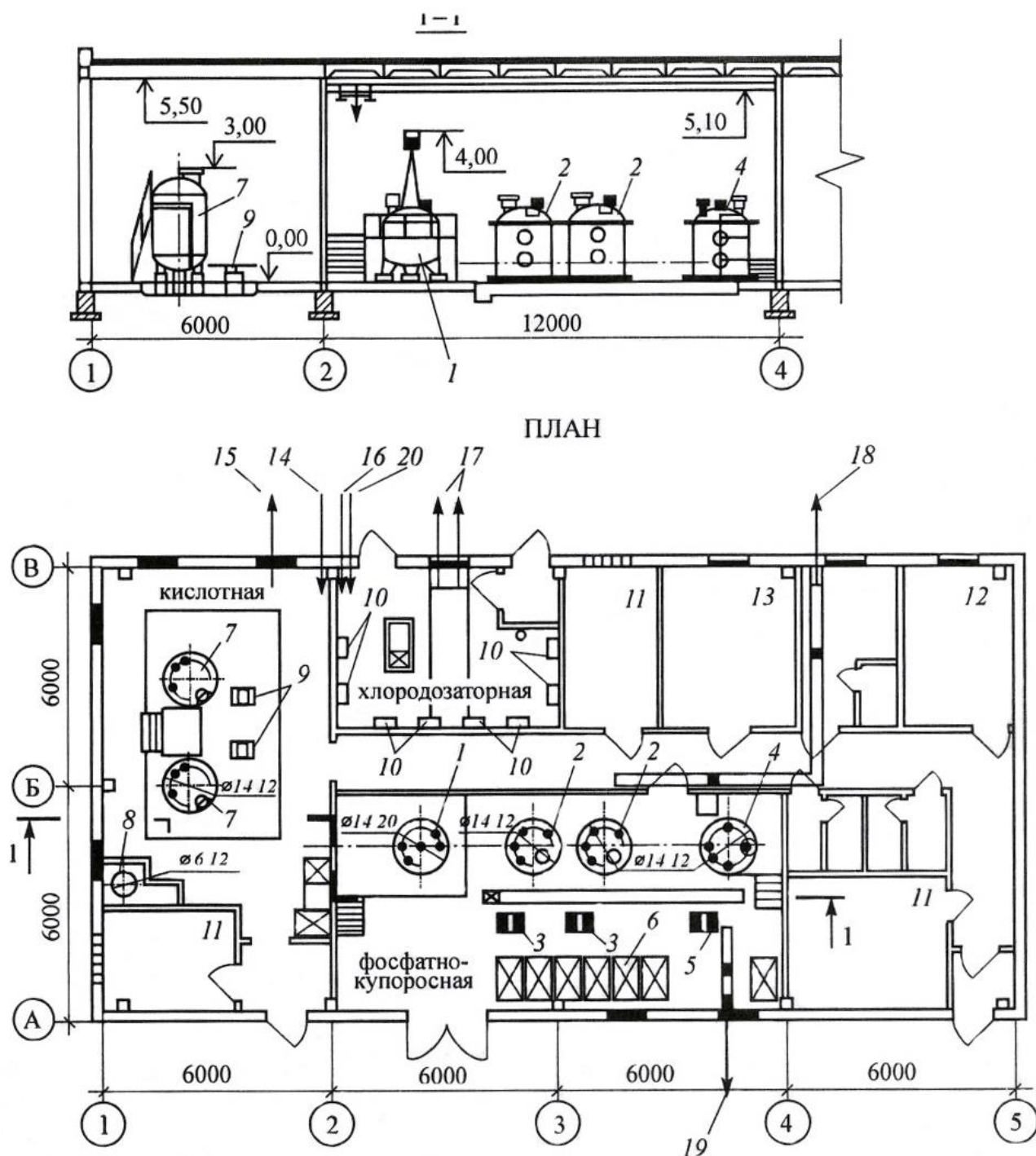


Рис. 3.27. Компонка станции стабилизационной обработки оборотной воды:

1 – мешалка для приготовления растворов фосфатов; 2 – емкости для раствора фосфатов; 3 – насосы-дозаторы фосфатов НД 1000/20; 4 – емкость для приготовления раствора медного купороса; 5 – насосы-дозаторы раствора медного купороса НД 1000/20; 6 – поддоны для сухих реагентов фосфата и медного купороса; 7 – емкость для кислоты; 8 – емкость раствора щелочи; 9 – насосы-дозаторы кислоты НД 100/20; 10 – хлораторы ЛОНИИ -100; 11 – венткамеры; 12 – бытовые помещения; 13 – электроцитовая; 14 – трубопровод приема кислоты со склада; 15 – трубопровод подачи отдозированной кислоты в систему; 16 – трубопровод хлоргаза с базисного склада; 17 – трубопровод подачи хлора после хлоратора в систему; 18 – трубопровод подачи

отдозированного раствора фосфатов в систему; 19 – трубопровод подачи отдозированного раствора медного купороса в систему; 20 – трубопровод сжатого воздуха

3.5.2. Оценка коррупционных рисков в производственной деятельности при проектировании систем водоснабжения и водоотведения

Коррупционное правонарушение – злоупотребление служебным положением, дача взятки, получение взятки, злоупотребление полномочиями, коммерческий подкуп либо иное незаконное использование физическим лицом своего должностного положения вопреки законным интересам общества и государства в целях получения выгоды в виде денег, ценностей, иного имущества или услуг имущественного характера, иных имущественных прав для себя или для третьих лиц либо незаконное предоставление такой выгоды указанному лицу другими физическими лицами, а также совершение указанных деяний от имени или в интересах юридического лица.

Коррупционная схема – способ совершения коррупционного правонарушения; коррупционный риск – возможность совершения коррупционного правонарушения, возникающая в условиях наличия коррупциогенных факторов.

Коррупциогенные факторы – явление или совокупность явлений, объективные и субъективные предпосылки, порождающие коррупционные правонарушения или способствующие их распространению, а также положения нормативных правовых актов (проектов нормативных правовых актов), устанавливающие для правоприменителя необоснованно широкие пределы усмотрения или возможность необоснованного применения исключений из общих правил, а также положения, содержащие неопределенные, трудновыполнимые и (или) обременительные требования к гражданам и организациям и тем самым создающие условия для проявления коррупции.

Оценка коррупционного риска – процесс идентификации, анализа и оценивания коррупционного риска.

Анализ коррупционного риска – процесс определения происхождения коррупционного риска, в том числе наиболее вероятных способов совершения коррупционного правонарушения при реализации функции организации, а также определения уровня риска (комбинации возможности возникновения коррупционных правонарушений и их последствий).

Оценка коррупционных рисков относится к числу основных инструментов предупреждения коррупционных правонарушений в организациях и позволяет решить задачи по обеспечению соответствия реализуемых мер по противодействию коррупции реальным или вероятным способам совершения коррупционных правонарушений, тем самым увеличивая действенность антикоррупционных мероприятий, повышая эффективность использования выделяемых на них кадровых, финансовых и иных ресурсов; формирования обоснованного перечня должностей, замещение которых связано с коррупционными рисками.

Оценку коррупционных рисков в целях подготовки карт коррупционных рисков рекомендуется проводить в соответствии со следующими основными принципами.

Полнота. Коррупционные риски могут возникать при реализации любой административной процедуры (действия). В связи с этим необходимо учитывать, что применение подхода, при котором из общего числа процедур (действий) в организации заранее выделяется перечень коррупционно-опасных функций, имеет существенные недостатки. Соблюдение принципа полноты позволяет значительно сократить вероятность того, что отдельные административные процедуры (действия), при реализации которых возможно возникновение коррупционного риска, будут проигнорированы, поскольку изначально они не признаны коррупционно-опасными.

Рациональное распределение ресурсов. Оценку коррупционных рисков следует проводить, учитывая возможности кадровых, финансовых и иных ресурсов организации для ее реализации.

Всесторонность определения коррупционных рисков. Определение состава потенциальных коррупционных правонарушений и анализ вероятных способов их совершения (коррупционных схем), позволяет разработать наиболее эффективные меры предупреждения коррупции в организации.

Взаимосвязь результатов оценки коррупционных рисков с проводимыми антикоррупционными мероприятиями. Результаты оценки коррупционных рисков являются основой для определения перечня должностей замещение, которых связано с коррупционными рисками.

Своевременность и регулярность оценки коррупционных рисков. Проводить оценку коррупционных рисков целесообразно на системной основе. Углубленную оценку коррупционных рисков рекомендуется проводить раз в 2-3 года и (или) при любом существенном изменении регулирующего законодательства, организационно-штатной структуры, выявлении коррупционных правонарушений и иных факторов, свидетельствующих о возможности возникновения коррупционных рисков.

Раз в год целесообразно проводить текущую оценку коррупционных рисков, предполагающую анализ функций организации, связанных с коррупционными рисками, на предмет необходимости принятия дополнительных мер, направленных на минимизацию выявленных рисков.

Законность. Оценка коррупционных рисков основывается на принципе законности на всех этапах оценки.

Гласность. Организация размещает информацию о результатах оценки коррупционных рисков на своем официальном сайте в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» в разделе «Противодействие коррупции» с учетом требований законодательства Российской Федерации. Для информации о проведении оценки коррупционных рисков целесообразно выделить отдельный подраздел в разделе «Противодействие коррупции».

Привлечение заинтересованных сторон. Процесс оценки коррупционных рисков предполагает участие и учет мнения всех заинтересованных сторон (институты гражданского общества, эксперты и др.).

Процедура оценки коррупционных рисков состоит из нескольких последовательных этапов. Схема проведения оценки коррупционных рисков приведена на рис. 3.28.

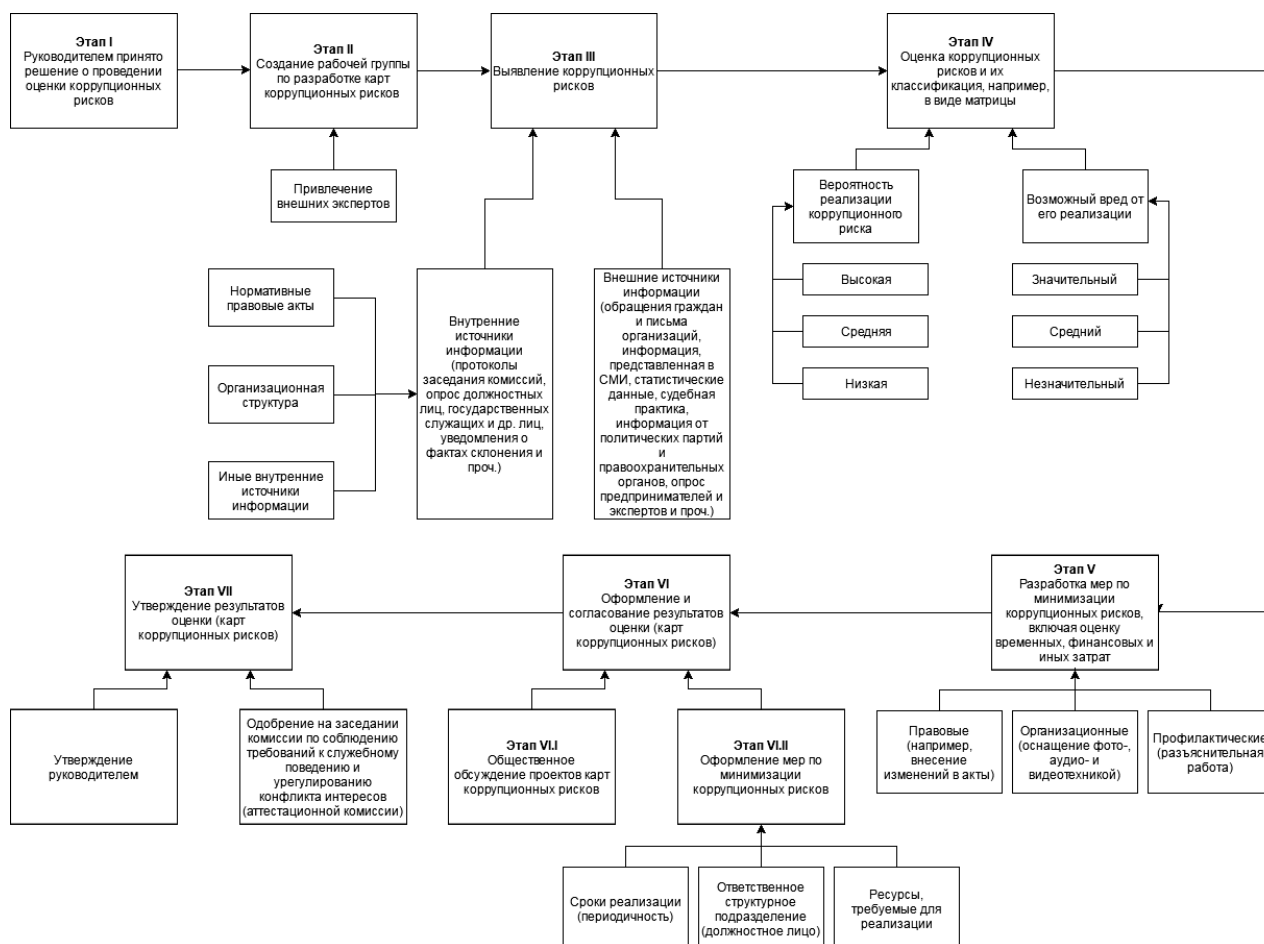


Рис. 3.28. Схема проведения оценки коррупционных рисков.

Наличие коррупциогенного фактора является признаком коррупционного риска. К числу коррупциогенных факторов, например, относятся:

– возможность получения служащим (работником) в результате совершения коррупционного правонарушения значительной, по сравнению с его доходом, материальной выгоды или возможность получения регулярного незаконного дохода при неоднократной реализации одной и той же коррупционной схемы;

– возможность реализации потенциальной коррупционной схемы без значительных усилий, в том числе:

– узкий круг служащих (работников), участие которых необходимо для реализации коррупционной схемы;

– многочисленные зафиксированные факты реализации коррупционной схемы;

– отсутствие или неэффективность механизмов внутреннего контроля, в том числе:

– наличие «слепых зон» – отсутствие контроля за отдельными административными процедурами (действиями) либо их этапами, важными для реализации потенциальной коррупционной схемы;

– отсутствие *регулярного* контроля за деятельностью служащих (работников), осуществление контроля только в форме эпизодических проверок, ревизий и т.п.;

– объективные трудности осуществления контроля, например, необходимость обработки в рамках контроля больших объемов быстро меняющейся информации;

– объем дискреционных полномочий служащего (работника), принимающего решение, и недостаточная регламентация процесса, в том числе:

– отсутствие четких критериев выбора одного из альтернативных решений;

– отсутствие сроков совершения действия;

– открытый перечень документов, которые могут быть истребованы для совершения действия;

– отсутствие эффективных каналов подачи и механизмов рассмотрения жалоб на действия служащего (работника).

Выявлению коррупциогенных факторов способствует анализ различного рода информации, поступающей как из внутренних источников, так и из внешних источников.

К *внутренним источникам* информации относятся следующие:

– нормативные правовые акты (при анализе нормативных правовых актов необходимо, в частности, оценить положения, касающиеся функций органа (организации), связанные с коррупционными рисками);

– локальные нормативные акты (анализ организационной структуры организации, в том числе должностных (служебных) обязанностей при осуществлении административных процедур (действий));

– иные внутренние источники, к которым можно отнести, например, протоколы заседания комиссии по соблюдению требований к служебному поведению и урегулированию конфликта интересов (аттестационной комиссии), материалы служебных проверок, результаты опроса уполномоченных должностных лиц, служащих (работников), уведомления представителя нанимателя о фактах обращения в целях склонения служащего (работника) к совершению коррупционных правонарушений и др.

Для получения информации, необходимой для проведения оценки коррупционных рисков, рекомендуется сформировать перечень локальных нормативных актов и иных документов организации.

К таким документам относятся документы, содержащие информацию о направлениях деятельности (функциях) и структуре организации, полномочиях его подразделений и должностных (служебных) обязанностях служащих (работников), например:

– положение об органе (организации); организационно-штатная структура и штатное расписание;

– положения о подразделениях организации;

– должностные регламенты;

– результаты внутреннего и (или) внешнего анализа структуры, функционала и иные значимые документы.

К *внешним источникам* информации можно отнести следующие:

– результаты опроса подконтрольных субъектов, получателей услуг, экспертов, представителей институтов гражданского общества и иных заинтересованных лиц;

– социологические исследования, проводимые органом (организацией) или сторонними исследовательскими организациями;

– статистические данные о правонарушениях в сфере деятельности организации;

– обращения граждан и организаций, содержащие информацию о коррупционных правонарушениях, в том числе обращения, поступившие на «горячую линию», «электронную приемную» и т.д.;

– сообщения в СМИ о коррупционных правонарушениях или фактах несоблюдения служащими (работниками) требований к служебному поведению;

– материалы, представленные правоохрнительными органами, иными органами (организациями) и их должностными лицами, включая акты прокурорского реагирования, материалы уголовных дел, материалы, представляемые органами следствия и др.;

– материалы, представленные постоянно действующими руководящими органами политических партий и зарегистрированных в соответствии с законом иных общероссийских общественных объединений, не являющихся политическими партиями, Общественной палатой Российской Федерации, институтами гражданского общества и из других источников.

Опрос целесообразно проводить по мере необходимости, но не реже одного раза в год.

Целью проведения опроса является выявление коррупционных рисков.

Задачами опроса являются следующие:

– определение сфер деятельности организации с высокими коррупционными рисками;

– выявление причин и условий, способствующих коррупционным проявлениям; оценка влияния реализации антикоррупционных мер;

– выявление ключевых направлений повышений эффективности деятельности органов (организаций) по противодействию коррупции,

упреждению возможностей возникновения и действия коррупциогенных факторов и формирования антикоррупционного общественного мнения;

- прогнозирование возможного развития коррупционной обстановки.

Рабочей группой:

- разрабатывается анкета для проведения опроса;
- проводится оценка результатов опроса;
- осуществляется подготовка сводного отчета о результатах проведения опроса;
- осуществляется выработка на основе результатов опроса предложений по повышению эффективности деятельности в сфере противодействия коррупции.

Анкету целесообразно разместить на официальном сайте организации в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» в подразделе, посвященном вопросам противодействия коррупции. На главной странице целесообразно разместить отдельную гиперссылку на данный подраздел.

На основании проведенного анализа внутренних и внешних источников информации, а также выявленных коррупциогенных факторов составляется перечень коррупционных рисков.

Результаты работы по проведению опроса представляются руководителю (уполномоченному должностному лицу) организации и размещаются на официальном сайте организации в информационно-телекоммуникационной сети «Интернет» в разделе «Противодействие коррупции».

В целях рационального расходования ресурсов возможно выделение отдельных наиболее коррупционнoемких административных процедур (действий), в отношении которых меры по минимизации коррупционных рисков будут реализованы в первую очередь. Для этого следует оценить коррупционные риски с точки зрения их значимости для организации, государства и общества.

Значимость коррупционных рисков определяется сочетанием рассчитанных параметров: вероятности реализации коррупционного риска (вероятность) и возможного вреда от его реализации (вред).

Вероятность реализации коррупционного риска определяется, в первую очередь, характеристикой и количеством коррупциогенных факторов, т.е. обстоятельств, увеличивающих вероятность совершения коррупционных правонарушений.

В зависимости от вероятности возникновения риск может быть:

незначительной вероятности возникновения (низкая вероятность) – риск может возникнуть в чрезвычайных обстоятельствах или маловероятен; средней вероятности возникновения (средняя вероятность) – риск может возникнуть при определенном стечении обстоятельств; повышенной вероятности возникновения (высокая вероятность) – риск ожидается при нормальном развитии событий.

Необходимо оценить возможный вред от реализации коррупционного риска. При этом приоритетное внимание рекомендуется уделить следующим видам вреда (ущерба):

- вред жизни и здоровью граждан; вред национальной безопасности и обороноспособности государства;
- вред окружающей среде; материальный ущерб;
- репутационный ущерб органу (организации), резонансные судебные разбирательства, многочисленные жалобы и претензии со стороны граждан и организаций.

В зависимости от эффекта риски могут быть следующими:

- незначительный – риск незначительно влияет на охраняемые законом ценности; умеренный – риск, который, если не будет пресечен, может значительно повлиять на охраняемые законом ценности;
- значительный – риск, последствия которого могут повлечь значительные финансовые убытки, помешать успеху деятельности или эффективному функционированию организации, государства и общества.

В случае если реализация коррупционного риска может повлечь вред жизни и здоровью граждан, нанести ущерб национальной безопасности и обороноспособности государства и (или) окружающей среде, такой потенциальный вред следует оценивать как значительный.

Одним из возможных способов оценки значимости коррупционного риска является использование матрицы оценки значимости рисков. При этом все риски по степени своей значимости разделяются на критические, существенные и незначительные. Базовый вариант такой матрицы представлен в таблице 3.2.

Таблица 3.2.

Матрица оценки значимости коррупционных рисков

Потенциальный вред	Вероятность реализации коррупционного риска		
	Высокая	Средняя	Низкая
Значительный	Критический риск	Существенный риск	Существенный риск
Умеренный	Существенный риск	Существенный риск	Незначительный риск
Незначительный	Существенный риск	Незначительный риск	Незначительный риск

Результаты работы по оценке и классификации коррупционных рисков представляются руководителю (уполномоченному должностному лицу) организации.

Этап разработки мер по минимизации коррупционных рисков – подготовка предложений по минимизации всех или наиболее существенных идентифицированных коррупционных рисков.

Минимизация коррупционных рисков либо их устранение достигается различными методами, которые можно подразделить на следующие виды: правовые; организационные; профилактические.

При подготовке предложений по минимизации коррупционных рисков в федеральных государственных органах, осуществляющих контрольно-надзорные полномочия, целесообразно учесть мероприятия, предусмотренные паспортом приоритетной программы «Реформа контрольной и надзорной деятельности», утвержденном президиумом Совета при Президенте Российской Федерации по стратегическому развитию и приоритетным проектам (протокол от 21 декабря 2016 года № 12), а также паспортами приоритетных проектов Минэкономразвития России, Минкомсвязи России, Минтруда России и Минюста России.

К таким мероприятиям можно отнести следующие:

- использование проверочных листов;
- актуализация и оптимизация обязательных требований; установление исчерпывающих перечней нормативных правовых актов, содержащих обязательные требования;
- обеспечение доступности и понятности информации о подконтрольных объектах;
- формирование системы сбора объективных данных для определения категории риска (класса опасности);
- использование механизма профилактики нарушений обязательных требований;
- использование информационно-коммуникационных технологий и другие мероприятия, снижающие усмотрение должностных лиц при принятии управленческих решений, а также повышающие эффективность контроля за их деятельностью.

В качестве установления препятствий (ограничений), затрудняющих реализацию коррупционных схем, предлагается применять следующие меры:

- проверка наличия возможной аффилированности между подконтрольным субъектом и служащими (работниками), проводимая уполномоченным подразделением организации (в частности, с использованием информационно-коммуникационных технологий);

– перераспределение функций между подразделениями внутри организации;

– введение или расширение процессуальных форм взаимодействия граждан (юридических лиц) и должностных лиц, например, использование информационных технологий в качестве приоритетного направления для осуществления служебной деятельности («одно окно», система электронного обмена информацией);

– исключение необходимости личного взаимодействия (общения) должностных лиц с гражданами и юридическими лицами;

– совершенствование механизма отбора должностных лиц для включения в состав комиссий, рабочих групп, принимающих управленческие решения;

– оптимизация перечня документов (материалов, информации), которые граждане (юридические лица) обязаны предоставить для реализации права;

– сокращение сроков принятия управленческих решений;

– установление регламентации способа и сроков совершения действий должностным лицом при осуществлении коррупционно-опасной функции;

– установление дополнительных форм отчетности должностных лиц о результатах принятых решений;

– использование средств видеонаблюдения и аудиозаписи в местах приема граждан и представителей юридических лиц;

– сокращение ситуаций единоличного принятия решений;

– проведения разъяснительной и иной профилактической работы для существенного снижения возможностей коррупционного поведения при исполнении коррупционно-опасных функций;

– обеспечение повседневного контроля за соблюдением служащими (работниками) этических норм поведения.

Для каждого выявленного коррупционного риска должны быть определены возможные меры по минимизации соответствующих коррупционных рисков. При этом необходимо оценить объем финансовых

затрат на реализацию этих мер, а также потребность в кадровых и иных ресурсах, необходимых для проведения соответствующих мероприятий.

В случае невозможности или экономической нецелесообразности одновременной реализации мер по минимизации всех выявленных коррупционных рисков необходимо, в первую очередь, реализовать меры по минимизации существенных коррупционных рисков.

При определении мер по минимизации коррупционных рисков целесообразно руководствоваться следующим:

- каждую меру необходимо сформулировать конкретно, служащие (работники), вовлеченные в процесс ее реализации, должны понимать ее цели и содержание, конечный результат и его связь с минимизацией конкретного коррупционного риска;

- для каждой меры должен быть установлен срок или периодичность ее реализации;

- для каждой меры должен быть определен ответственный за ее реализацию;

- на стадии планирования мер по минимизации коррупционных рисков должны быть проработаны механизмы мониторинга реализации этих мер и оценки их эффективности;

- реализация каждой меры должна быть подтверждена документально.

Меры по минимизации выявленных коррупционных рисков после их утверждения или одобрения целесообразно включить в ведомственный план противодействия коррупции.

Результаты работы по разработке мер по минимизации выявленных коррупционных рисков представляются руководителю (уполномоченному должностному лицу) организации.