

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

БРАТСКИЙ ЦЕЛЛЮЛОЗНО-БУМАЖНЫЙ КОЛЛЕДЖ

ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БРАТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Специальность 13.02.02

Теплоснабжение и теплотехническое оборудование

МЕТОДИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ

*ПО ВЫПОЛНЕНИЮ САМОСТОЯТЕЛЬНЫХ И ДОМАШНИХ
КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ С КУРСОМ ЛЕКЦИЙ И ГЛОССАРИЕМ*

*по МДК 05.01 ВОДОПОДГОТОВКА
для студентов заочной формы обучения*

Братск 2021

Составила (разработала) Долотова И.В., преподаватель кафедры ЭиСД (энергетических и строительных дисциплин)

Данное методическое пособие разработано как курс лекций по МДК 05.01 Водоподготовка.

В методическом пособии собран материал по всем темам на основании рабочей программы. Материал подобран таким образом, что может быть использован студентами дневного обучения, при подготовке к лекциям и к сдаче квалификационного экзамена, также этот материал может использоваться студентами заочного обучения, при написании домашней контрольной работы и для подготовки к сдаче экзаменов, в межсессионный период.

Также в данном методическом пособии представлены задания для самостоятельной работы, словарь основных терминов которые встречаются при изучении предмета.

Для более глубокой и самостоятельной проработки материала студентам предлагается полный список использованной литературы.

Рассмотрено на заседании кафедры ЭиСД

«28» октября 2021 г.



(подпись зав. кафедрой)

Содержание

Введение	5
1 Свойства воды	6
1.1 Качество природных вод	6
1.1.1 Основные понятия и определения	6
1.2 Характеристика природных вод и их загрязнений	8
1.2.1 Характеристика природных вод	8
1.2.2 Вещества, загрязняющие природные воды	10
1.3 Показатели качества воды	10
1.4 Удаление из воды грубодисперсных и коллоидных загрязнений	14
1.4.1 Удаление грубодисперсных соединений методом фильтрования	14
1.4.2 Устройство и эксплуатация различных видов фильтров	15
1.4.3 Удаление из воды коллоидных загрязнений	18
1.4.4 Схемы коагуляционных установок	19
1.4.5 Удаление из воды загрязнений в осветлителе методом осаждения	20
1.4.6 Схемы известковых установок	21
2 Обработка воды, пара и конденсата	26
2.1 Обработка воды методом ионного обмена	26
2.1.1 Обработка воды методом катионирования	26
2.1.2 Характеристика и свойства катионитов	28
2.1.3 Работа и регенерация ионитных фильтров	30
2.1.4 Устройство ионитных фильтров	34
2.1.5 Типы ионитных фильтров	36
2.1.6 Эксплуатация катионитных фильтров	42
2.2 Схемы катионитных водоподготовительных установок	44
2.2.1 Натрий-катионитные установки	44
2.2.2 Известково-натрий-катионитные установки	45
2.2.3 Водород-натрий-катионитные установки	46
2.2.4 Водород-катионитные установки с «голодной регенерацией»	48
2.3 Обессоливание воды по методу ионного обмена	49
2.3.1 Анионирование	49
2.3.2 Аниониты	50
2.3.3 Обессоливание воды	51
2.3.4 Схемы обессоливающих установок	52
2.3.5 Оборудование обессоливающих установок	55
2.3.6 Блочные обессоливающие установки	57
2.3.7 Эксплуатация обессоливающих ионообменных установок	59
2.4 Обработка пара и конденсата	61
2.4.1 Обезжелезивание конденсата	61
2.4.2 Обезжелезивание производственных конденсатов	62
2.4.3 Обезжелезивание конденсата электромагнитными фильтрами	63

2.4.4 Обезмасливание конденсата	64
2.2.5 Магнитная обработка воды	66
2.5.1 Магнитная обработка воды, конструкции аппаратов	66
2.6 Удаление из воды коррозионно-активных газов	67
2.6.1 Виды и места проявления коррозии в котлах	67
2.6.2 Деаэрация и декарбонизация воды. Устройство оборудования.	75
2.6.3 Химическое обескислороживание воды	79
2.7 Отложения в котлоагрегатах и теплообменниках, их предотвращение и удаление	81
2.7.1 Состав, свойства и количество отложений	81
2.7.2 Образование отложений в паровых котельных агрегатах	83
2.7.3 Образование отложений в прямоточных котельных агрегатах	85
2.7.4 Методы борьбы с отложениями в котельных агрегатах с естественной циркуляцией	86
2.7.5 Предотвращение образования отложений в прямоточных котельных агрегатах	90
2.7.6 Предотвращение образований отложений в конденсаторах паровых турбин	91
2.7.7 Предотвращение образований отложений в тепловых сетях	93
2.7.8 Удаление образовавшихся отложений	94
2.8 Загрязнение пара и способы борьбы с ним	96
2.8.1 Унос веществ насыщенным паром	96
2.8.2 Факторы, влияющие на качество пара котельных агрегатов с естественной циркуляцией	97
2.9 Образование солевых отложений в турбинах и пароперегревателях и их удаление	101
2.9.1 Паровые турбины	101
2.9.2 Пароперегреватели	102
2.10 Сепарационные устройства	104
2.11 Продувка котельных агрегатов с естественной циркуляцией	106
2.12 Вывод загрязнений из цикла паросиловой установки	107
2.13 Ступенчатое испарение	107
3 Задания для самостоятельной работы студентов заочной формы обучения	111
3.1 Методические указания по выполнению самостоятельной работы	111
3.2 Задания для выполнения домашней контрольной работы студентов заочной формы обучения	114
3.2.1 Указания к выполнению домашней контрольной работы	114
3.3 Критерии оценок	116
Глоссарий	117
Заключение	121
Список использованных источников	122

Введение

Использование воды в паровых котельных агрегатах связано с рядом затруднений, возникающих главным образом потому, что вода содержит вещества, способные разрушать нормальную работу котельного агрегата и турбины. Из воды или под ее воздействием на внутренних поверхностях нагрева котельных агрегатов нередко возникают отложения, которые, обладая низкой теплопроводностью, вызывают перегрев металла труб, уменьшающий его прочность. Вследствие ряда причин некоторое количество примесей, содержащихся в котловой воде, переходит в вырабатываемый котельным агрегатом пар. При этом отдельные примеси, например кремниевая кислота, склонны при некоторых условиях переходить из воды в пар в большем количестве, чем другие. Унесенные из котельного агрегата примеси выпадают из парового потока по тракту движения в виде различных твердых соединений, образующих иногда значительные отложения в пароперегревателях и проточной части турбин, что приводит к нарушению их нормальной работы. Поэтому предотвращение уноса примесей с паром или ограничение его некоторым допустимым минимумом является весьма важным для обеспечения надежной работы электростанций. Металл на различных участках пароводяного тракта электростанции омывается водой разного состава. При этом иногда создаются условия, при которых вода или пар на отдельных участках приобретают агрессивные свойства и разрушают металл. Этот процесс, называемый *коррозией*, может вызывать нарушение нормальной работы теплосилового оборудования. Обеспечение надежной работы электростанций предполагает, следовательно, устранение не только накипных отложений и солевых заносов, но и коррозионных повреждений.

Для устранения отмеченных недостатков водного режима существенное значение имеет соответствующая обработка воды и конденсата, поступающих в питательную систему котельного агрегата. Сюда входят различные технологические процессы: осветление, умягчение, обессоливание, обескремнивание, дегазация воды и др.

Таким образом, конечной целью водоподготовки является достижение экономичного и надежного водного режима электростанций путем изыскания и внедрения соответствующих способов подготовки воды и организации внутрикотловых процессов. Водоподготовка широко использует теоретические положения, выводы и достижения физики, термодинамики и особенно химии, без знания основ которой невозможно понять сущность многих рассматриваемых в водоподготовке процессов.

1 Свойства воды

1.1 Качество природных вод

1.1.1 Основные понятия и определения

Пароводяной цикл современных электростанций характеризуется наличием различных потоков пара, воды и конденсатов, которые оказывают влияние на качество питательной воды котельных агрегатов.

Забираемая из источника водоснабжения вода называется *исходной* (иногда *сырой, необработанной*). Обычно исходная вода подвергается специальной обработке для улучшения ее качества. Установки, на которых производится такая обработка, называются *водоподготовительными*, а вода, полученная в результате обработки – *химически обработанной*. Вода, поступающая в котельные агрегаты, называется *питательной*, а находящаяся в них – *котловой (или испаряемой) водой*.

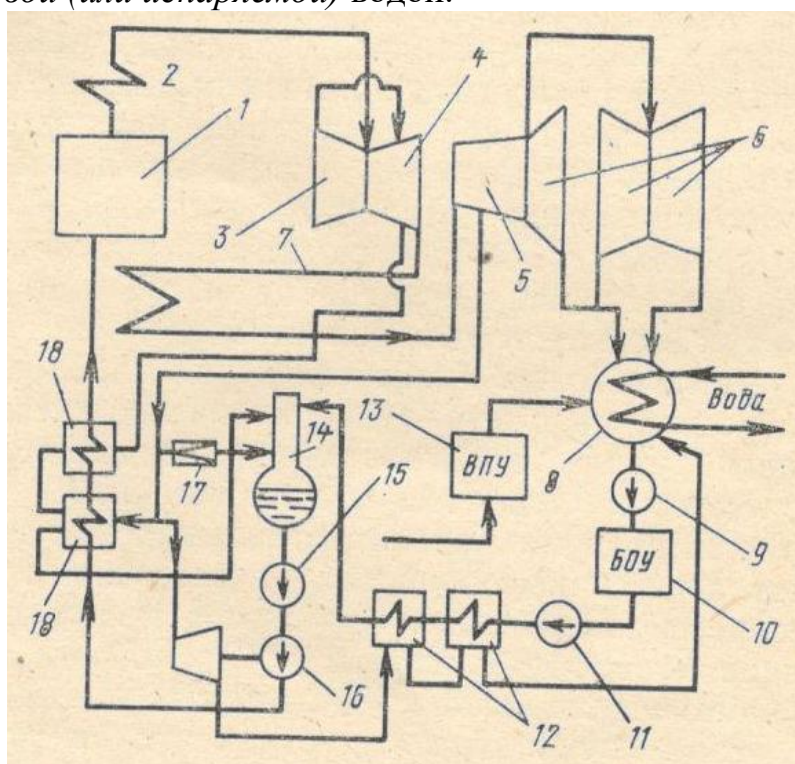


Рисунок 1 – Принципиальная схема пароводяного цикла энергоблока 300 МВт СКД

На рисунке 1 представлена принципиальная схема пароводяного цикла современного энергетического блока мощностью 300 МВт сверхкритического (25,5 МПа) давления (СКД). Выработанный котельным агрегатом 1 пар через пароперегреватель 2 поступает в паровую турбину состоящую из цилиндра сверхвысокого давления (СКД) 3, цилиндра высокого давления (ЦВД) 4, цилиндра среднего давления (ЦСД) 5 и цилиндра низкого давления (ЦНД) 6. Перегретый пар, вырабатываемый

котельным агрегатом, называется *свежим*. Он вначале проходит последовательно ЦСВД и ЦВД, затем промежуточный (вторичный) перегреватель (ППП) 7, в котором температура пара увеличивается с 593 до 838 °К. С такой температурой и давлением 3,6 МПа пар направляется в ЦСД, ЦНД и затем в конденсатор 8, охлаждаемый водой, называемой *циркуляционной* или *охлаждающей*. В конденсаторе пар превращается в конденсат, называемый *турбинным конденсатом*.

Конденсатными насосами первой ступени 9 турбинный конденсат подается на *блочную обессоливающую установку* (БОУ) 10, где происходит его очистка от суспендированных и ионизированных загрязнений. После БОУ конденсатными насосами второй ступени 11 конденсат направляется через подогреватели низкого давления (ПНД) 12 в деаэратор 14, куда поступает также и конденсат греющего пара подогревателей высокого давления (ПВД).

Так как в деаэратор направляется не только турбинный конденсат, но и другие потоки, то выходящая из деаэратора смесь называется уже питательной (а также *деаэрированной*) водой. Подогретая паром 17 до 428 °К и хорошо дегазированная (т. е. освобожденная от растворенных газов O₂, CO₂, N₂) питательная вода из деаэратора поступает в бустерные насосы 15, подающие ее на всас питательных насосов 16. Последние через ПВД 18 направляют ее в котельный агрегат 1, где и замыкается описанный здесь контур энергоблока.

В этом замкнутом цикле имеются, однако, потери пара и конденсата, значения которых для энергоблоков СКД находятся в пределах 1 – 2% паропроизводительности котельного агрегата. Эти потери восполняются *обессоленной водой*, приготовляемой на специальной водоподготовительной установке (ВПУ) 13.

Тепловую и электрическую энергию вырабатывают теплоэлектростанции. ТЭС используют электрическую энергию топлива для выработки электричества и тепловой энергии (рисунок 2).

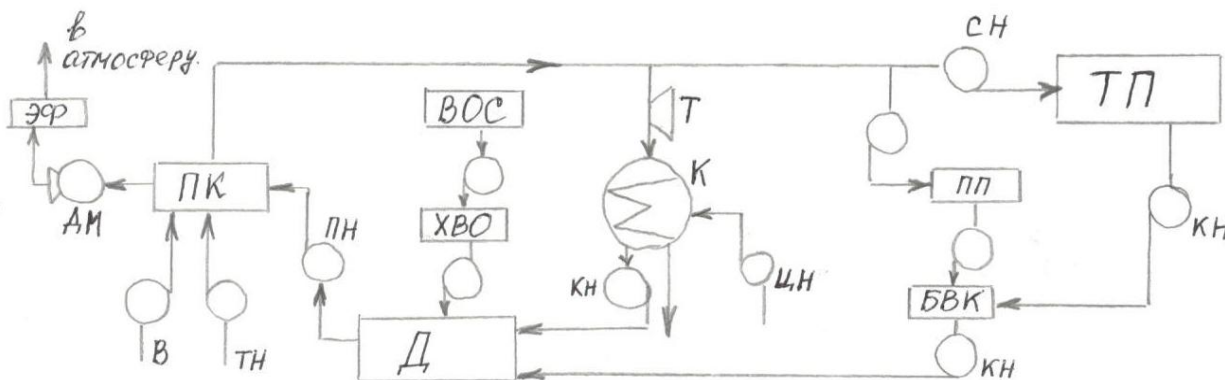


Рисунок 2 – Схема насосного оборудования теплоэлектростанции

где ВОС – водоочистная станция;
ХВО – химводоочистка;
Д – деаэратор;
ПК – паровой котел;
ЭФ – электрофильтр;
Т – турбина;
К – конденсатор;
ПП – производственные потребители;
ТП – тепловые потребители;
БВК – бак возврата конденсата;
пн – питательный насос;
тн – топливный насос;
сн – сетевой насос;
цн – циркуляционный насос;
в – вентилятор;
дм – дымосос;
кн – конденсатный насос.

На водоочистную станцию вода поступает из водохранилища, где производится очистка воды от грубых примесей. Далее вода поступает на ХВО, где идет глубокая химическая очистка воды, затем вода освобождается от растворенных в ней газов в деаэраторе. Подготовленная таким образом вода поступает в паровой котел и называется *питательной*. Внутри парового котла вода превращается в пар и называется *котловой*. Полученный пар может идти в турбинный цех для выработки электроэнергии к производственным потребителям (целлюлозное производство, фанерное, и т.д.). Часть пара расходуется на отопление и внутренние нужды (тепловые потребители). Отработанный пар конденсируется, очищается и снова отправляется в виде конденсата в паровой котел.

1.2 Характеристика природных вод и их загрязнений

1.2.1 Характеристика природных вод

Различают поверхностные и подземные (грунтовые) воды. Наибольшее практическое значение для промышленности имеют воды поверхностных источников, которыми являются реки, озера, искусственные водоемы (водохранилища, пруды) и моря. Качество речной воды зависит от характера питания реки, которое может включать в себя поверхностный сток, горно-снеговые и ледниковые воды, сток с болот, дождевые и снеговые стоки с поверхности почвы, грунтовое питание водами подземных источников, обработанные сточные воды промышленных предприятий и населенных пунктов. Для большинства рек химический состав воды сильно зависит от гидрометеорологических условий и времени года, т.к. поверхностный сток,

возникающий за счет атмосферных осадков, в отдельные периоды года является основным.

Почвенный покров, тесно соприкасающийся с водой, выпавшей в виде осадка, играет большую роль в процессе формирования состава природных вод. Если вода фильтруется через бедные солями торфяные или болотистые почвы, она загрязняется большим количеством органических веществ и лишь малой степени минеральными веществами.

Состав природных вод в значительной мере определяется также и климатом. Большое количество выпадающих осадков создает значительное увлажнение местности и большие величины стока, что снижает минерализацию природных вод за счет их разбавления, наоборот, малое количество осадков способствует увеличению минерального остатка воды. На севере, например, почвы хорошо промыты большим количеством выпадающих осадков, и поэтому природные воды в этих условиях мало минерализованы. В засушливых районах, наоборот, почвы отличаются значительным содержанием легкорастворимых солей, что и обуславливает образование воды с высоким сухим остатком.

По минеральному остатку, мг/л, речные воды можно условно разделить на следующие группы:

- малая минерализация - до 200 мг примесей на 1 литр воды;
- средняя минерализация - 200 - 500 мг примесей на 1 литр воды;
- повышенная минерализация - 500 - 1000 мг примесей на 1 литр воды;
- высокая минерализация - более 1000 мг примесей на 1 литр воды.

В период весеннего таяния снега поверхностный сток достигает максимума. Талые воды бедны солями, поэтому в паводковый период жесткость, щелочность и сухой остаток речной воды значительно понижаются. Наоборот, содержание в ней взвешенных веществ и органических загрязнений (окисляемость) в этот период сильно увеличивается вследствие смывания их водой с верхнего покрова почвы. Кроме весеннего, может быть осенний паводок, а для рек с горно-снеговым или ледниковым питанием - также и летний.

Состав подземных вод в значительно меньшей степени (в зависимости от глубины залегания), чем поверхностных, зависит от гидрометеорологических условий. Подземные воды отличаются более повышенной минерализацией, почти полным отсутствием взвешенных веществ и повышенным содержанием свободной углекислоты. Подземные воды более глубоко залегающих горизонтов практически обладают постоянным химическим составом, не зависящим от гидрометеорологических условий.

Вода стоячих открытых водоемов (водохранилищ и озер) имеет разнообразный состав и различную минерализацию. Это зависит от многих условий: климат (влажный, сухой), притока в водоем речной воды и ее качества, стока воды из водоема, количества испаряющейся из него воды,

воды морей и океанов отличаются высокой минерализацией. Сухой остаток воды открытого океана достигает 35 - 37 тыс. мг/кг.

1.2.2 Вещества, загрязняющие природные воды

Содержащиеся в природных водах вещества можно разделить на следующие три группы:

- грубодисперсные (взвешенные) вещества;
- коллоиды
- молекулярно и ионодисперсные вещества.

Взвешенные вещества представляют собой различного размера частички песка, глины, остатки растительности и других веществ, захватываемых с поверхности почвы дождевыми или талыми водами и уносимых в открытые водоемы - реки, озера, пруды.

В коллоидном состоянии присутствуют в воде вещества, как органического, так и минерального происхождения.

К группе молекулярно-дисперсных веществ относятся растворенные в воде газы и соли.

Все природные воды содержат также и газы, среди которых следует отметить кислород и углекислый газ, вызывающие коррозию металла. Поэтому дегазация является обязательной стадией обработки питательной воды котельных агрегатов.

1.3 Показатели качества воды

Качество исходной, подпиточной, питательной и котловой воды характеризуется содержанием взвешенных частиц, сухим остатком, общим солесодержанием, жесткостью, щелочностью, содержанием кремниевой кислоты (H_2SiO_3), концентрацией водородных ионов (H^+) и содержанием коррозионно-активных газов.

а) Сухим остатком воды называется суммарное количество нелетучих веществ, присутствующих в воде в коллоидном и молекулярно-дисперсном состоянии, выраженное в мг/кг.

Сухой остаток определяется выпариванием пробы воды и высушиванием её при температуре 110 – 120 °С. Количество этих веществ, определенное взвешиванием и пересчитанное на 1 кг воды, и дает сухой остаток. Следовательно, в понятии сухого остатка не входят растворенные в воде газы, летучие (например, NH_3) и взвешенные вещества.

При определении сухого остатка природных вод бикарбонаты кальция $Ca(HCO_3)_2$ и магния $Mg(HCO_3)_2$ переходят в карбонаты $CaCO_3$ и $MgCO_3$.

Помимо сухого, различают прокаленный, минеральный и сульфатный остатки. Если сухой остаток прокалить в течение нескольких минут при 800°С, то масса его уменьшится и получится прокаленный остаток. Уменьшение массы происходит за счет сгорания органических веществ,

улетучивания остатка влаги и т.д. Может быть, однако, и увеличение массы за счет окисления металлов.

Величина, полученная путем суммирования всех найденных в воде анализом катионов, анионов и в том числе CO_3^{2-} , а также Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 , называется минеральным остатком. Если сухой остаток обработать серной кислотой, то все катионы переходят в сернокислые соединения (сульфаты), общая масса которых и дает сульфатный остаток.

б) *Общее солесодержание.* Во взвешенном состоянии находятся частицы примесей, удаляемые из воды путем фильтрования; содержание взвешенных частиц оценивают в миллиграммах на 1 кг воды (мг/кг).

Общее солесодержание определяется по величине сухого остатка примесей, получающегося после испарения 1 кг отфильтрованной воды и высушивания осадка при температуре 105 °С; измеряется в миллиграммах остатка на 1 кг воды (мг/кг).

Одно из важных свойств воды – растворять многие вещества с образованием растворов. Присутствие катионов кальция и магния в природной воде – результат растворения в ней хлоридов, сульфатов, гидрокарбонатов, нитратов, силикатов и других солей, содержание которых зависит от географического местонахождения источника воды, используемой для водоподготовки, т.е. для выработки опресненной или обессоленной воды.

Содержание находящихся в воде солей зависит от их растворимости (качественно о растворимости судят по данным специальной таблицы растворимости в воде солей и гидроксидов металлов). Например, хорошо растворимыми в воде являются соли щелочных металлов (K_3PO_4 , NaHCO_3) и хлориды (CaCl_2 , MgCl_2).

в) *Жесткость.* Совокупность свойств воды, обусловленных наличием в ней преимущественных катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} , определяется соответственно кальциевой и магниевой жесткостью.

Сумма концентраций катионов кальция $\text{C}(\text{Ca}^{2+})$ и магния $\text{C}(\text{Mg}^{2+})$ в воде называется *общей жесткостью* Ж_0 , которая, в свою очередь, подразделяется на карбонатную и некарбонатную жесткости.

Карбонатная жесткость воды обусловлена содержанием в ней гидрокарбонатов кальция $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ и магния $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$. Карбонатную жесткость можно снизить или устранить полностью путем кипячения воды, поэтому ее называют также *временной жесткостью*.

В процессе кипячения гидрокарбонаты разлагаются с выделением CO_2 и переходят в нерастворимую форму солей CaCO_3 и MgCO_3 , выпадающих в виде рыхлых осадков (шлама), которые удаляют в процессе периодических продувок.

Некарбонатная жесткость воды определяется по наличию в ней всех остальных (помимо гидрокарбонатов) солей кальция и магния – хлоридов CaCl_2 , MgCl_2 , сульфатов $\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$, MgSO_4 и др. При нагревании и

кипячении воды некарбонатная жесткость воды не уменьшается, поэтому ее называют также *постоянной жесткостью*.

Повышенная жесткость воды является причиной образования плотных отложений. На внутренних стенках паровых котлов и трубопроводов из жесткой воды осаждаются твердые соли, в основном карбонат и сульфат кальция – накипь.

Количественно карбонатная (временная) жесткость равна концентрации катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} , эквивалентной (соответствующей) удвоенной концентрации гидрокарбонат-ионов HCO_3^- а некарбонатная (постоянная) – концентрации катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} за вычетом карбонатной жесткости. В качестве анионов могут быть выбраны ионы SO_4^{2-} , хотя в воде могут находиться хлориды, нитраты, силикаты магния и кальция (поэтому некарбонатную жесткость иногда называют сульфатной жесткостью).

г) Щелочность – это общее содержание веществ, которые при разложении или реакции с водой обуславливают равномерную концентрацию ионов OH^- ; HCO_3^- ; CO_3^{2-} . Если в воде присутствует ион OH^- , то щелочность называют *гидратной Щ_г*. Если присутствует HCO_3^- , то щелочность называют *бикарбонатной Щ_б*. В присутствии CO_3^{2-} - щелочность называют *карбонатной Щ_к*. Общая щелочность воды определяется количеством затраченной на титрование кислоты с индикатором метилоранжем и характеризуется наличием в воде щелочных соединений, таких как NaOH – гидроксид натрия (едкий натр), Na_2CO_3 – безводный карбонат натрия (кальцинированная сода), NaHCO_3 – гидрокарбонат натрия (питьевая сода), Na_3PO_4 — тринатрийфосфат и др.

Общая щелочность складывается из гидратной, бикарбонатной и карбонатной щелочностей, т.е.

$$\text{Щ}_o = \text{Щ}_г + \text{Щ}_б + \text{Щ}_к \quad (1)$$

где Щ_o – общая щелочность;

$\text{Щ}_г$ – гидратная щелочность;

$\text{Щ}_б$ – бикарбонатная щелочность;

$\text{Щ}_к$ – карбонатная щелочность.

Щелочность воды, как и ее кислотность, может быть определена с помощью водородного показателя pH. Молекулы воды, являющиеся очень слабым электролитом, диссоциируют на ионы по реакции $\text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$. Для чистой воды установлено, что при температуре 22 °С в процессе диссоциации образуются в равных концентрациях водородные H^+ и гидроксидные OH^- ионы, т.е. выполняется равенство $\text{C}(\text{H}^+) = \text{C}(\text{OH}^-) = 10^{-7}$ моль/л. Для удобства используют десятичный логарифм концентрации ионов водорода, взятый с обратным знаком. Данная величина получила название *водородный показатель* и обозначение pH.

Таким образом, для нейтрального раствора, каким является чистая вода, $pH = 7$, в растворе с кислотными свойствами $pH < 7$, а в щелочной среде $pH > 7$.

д) Кремнесодержанием называется концентрация кремниевой кислоты H_2SiO_3 в пересчете на двуокись кремния SiO_2 , находящуюся в исходной воде. Присутствие SiO_2 в питательной воде котельных агрегатов, особенно давлением 4,0 МПа и выше, при некоторых условиях приводит к ряду затруднений в эксплуатации. А именно: образуются силикатные накипи, обладающие низкой теплопроводностью; возникает занос проточной части турбин аналогичными соединениями. Поэтому технология обработки исходной воды нередко включает в процесс ее частичного или полного обескремнивания.

Концентрация SiO_2 в природных водах изменяется в широких пределах (от 5 до 90 мг/л). Чем больше минерализация воды, тем меньше кремнесодержание, и наоборот.

е) Окисляемость воды характеризуется наличием в ней органических соединений. С достаточной степенью точности ее можно определить также по потере массы сухого остатка при его сжигании при температуре 800 °С.

Важное значение для характеристики качества воды имеет также наличие анионов кремния, приводящих к отложениям минеральных солей в системах циркуляции водоснабжения.

Присутствие растворенных газов O_2 и CO_2 определяет в основном коррозионные свойства воды.

Вода, подготовленная для питания котла, не должна давать отложений шлама и накипи, разъедать внутренние стенки труб поверхностей нагрева, а также вспениваться.

Окисляемость характеризует загрязненность воды органическими веществами. Она определяется количеством кислорода, нужного для окисления присутствующей в пробе воды. Окисляемость выражается количеством миллиграммов кислорода, потребных для окисления в определенных условиях органических веществ, содержащихся в 1 кг исследуемой воды, и обозначается мг/кг O_2 . Также окисляемость может быть еще выражена количеством мг/кг $KMnO_4$, израсходованного на окисление органических веществ.

ж) Прозрачность характеризует концентрацию взвешенных в воде веществ. Её определяют в специальных стеклянных цилиндрах, в которых на дне нанесены крестообразные полоски толщиной в 1 мм на белом матовом фоне или может быть нанесен печатный шрифт. Прозрачность определяется высотой столба воды в сантиметрах, налитой в такой цилиндр.

1.4 Удаление из воды грубодисперсных и коллоидных загрязнений

1.4.1 Удаление грубодисперсных соединений методом фильтрования

В природной воде находятся крупнодисперсные и коллоидные минеральные и органические примеси, которые значительно различаются по крупности частиц. Для удаления веществ, находящихся во взвешенном состоянии, используют методы отстаивания, фильтрования и коагуляции.

Отстаивание проводят в отстойниках. Длительность этого процесса зависит от плотности частиц, их размера и формы. Объем отстойника обычно соответствует полуторной или удвоенной часовой производительности. Скорость осаждения мелких частиц невелика, и поэтому воду после отстаивания подвергают дальнейшему осветлению – фильтрованию.

Фильтрование – это процесс осветления воды путём пропуска её через пористый материал, на поверхности и в порах которого вода оставляет грубодисперсные примеси.

Аппарат, в котором происходит процесс фильтрования, называют *фильтром*, а пористый материал, содержащийся в нём – *фильтрующим материалом*. В качестве фильтрующего материала применяют дробленый антрацит, кварцевый песок, мрамор, доломит с размером частиц 0,6... 1 мм, которыми заполнены закрытые напорные фильтры.

Фильтры, служащие для целей осветления воды, называются *осветлительными фильтрами*; иногда их называют механическими фильтрами.

Осветлительный фильтр представляет собой цилиндрический металлический резервуар с эллиптическими днищами, в котором на дренажном расширительном устройстве располагается слой фильтрующего материала. Вода после предварительного отстаивания и коагуляции или непосредственно в смеси с коагулянтom поступает в верхнюю часть фильтра через дырчатое распределительное устройство. Просачиваясь со скоростью 12...15 м/ч через фильтрующий материал с высотой слоя 800...1 200 мм, вода оставляет на его поверхности и в толще взвешенные вещества и хлопья коагулянта, т.е. осветляется, после чего через дренажную систему отводится в бак. В процессе фильтрации (обычно в течение 5...6 ч) фильтрующий материал загрязняется осадком, в результате требуется периодическое его очищение (регенерация). С этой целью фильтрацию приостанавливают, загрязненный фильтр промывают потоком чистой отфильтрованной воды, направленным снизу вверх. Для улучшения промывки фильтрующего материала его «взрыхляют» сжатым воздухом, подаваемым снизу под фильтрующий материал. Осветлительный фильтр имеет два люка для загрузки фильтрующего материала, осмотра и ремонта.

Фильтрование воды происходит под воздействием разности давлений над слоем фильтрующего материала h_H и под ним h_P . При работе фильтра Δh

$= h_H - h_{II}$ называется *потерей напора в фильтрующем слое*. Обычно в Δh входит потеря напора не только в фильтрующем слое, но и в самом фильтре (в распределительных устройствах, трубопроводах и др.).

Потеря напора в фильтрующем слое (иначе называемая сопротивлением этого слоя) зависит от скорости фильтрования, высоты фильтрующего слоя, диаметра зерен фильтрующего материала и степени заноса его загрязнениями. Увеличение численного значения этих факторов (кроме размера зерен) вызывает возрастание Δh . В процессе работы фильтра из перечисленных величин изменяется только загрязненность фильтрующего слоя, которая непрерывно возрастает.

По достижении предельного загрязнения фильтр водится из работы и ставится на промывку, промывке удержанные фильтрующим слоем загрязнения вымываются. Промытый фильтр вновь включается в работу. Время работы фильтра между двумя последовательными промывками называется его *рабочим периодом* или *фильтроциклом*.

Для эксплуатации желательна наибольшая длительность фильтроцикла, но не менее 8 часов. Величина фильтроцикла зависит от концентрации взвешенных веществ в фильтровальной воде и грязеемкости фильтра.

Грязеемкостью фильтра называется количество задержанных фильтром за фильтроцикл загрязнений, отнесенное к 1 м^3 фильтрующего материала и выраженное в кг. Чем выше грязеемкость, тем больше длительность фильтроцикла.

Значительно быстрее и полнее процессы отстаивания и фильтрования протекают при *коагуляции*.

1.4.2 Устройство и эксплуатация различных видов фильтров

Существуют разные типы и конструкции осветлительных фильтров, схемы которых представлены на рисунке 3. Конструктивно наиболее простым является однопоточный (однослойный) напорный фильтр 1. Внутренний его объем заполнен на определенную высоту слоем фильтрующего материала, сверху которого располагается водяной объем, называемый *водяной подушкой*. Напорные фильтры работают под давлением, создаваемым насосами.

В открытых фильтрах 2 фильтрование происходит под напором столба воды h в самом фильтре. Они широко используются на очистных установках питьевого водоснабжения. Изготавливаются эти фильтры из железобетона, имеют прямоугольную форму в сечении и большую поверхность фильтрования. Сравнительно малый напор h ограничивает возможность форсированной их работы.

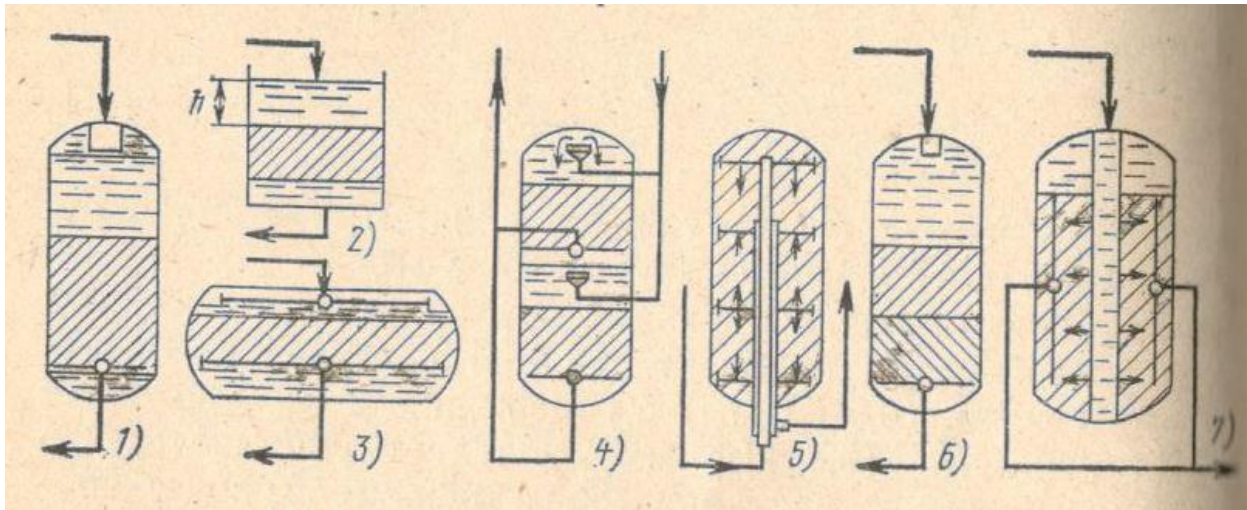


Рисунок 3 – Схемы осветлительных фильтров

1 – однопоточный; 2 – открытый; 3 – горизонтальный; 4 – двухкамерный; 5 – трехпоточный; 6 – двухслойный; 7 – радиальный.

Горизонтальные напорные фильтры 3 обладают большой поверхностью фильтрования и, следовательно, единичной производительностью. Однако они громоздки и при установке в помещении требуют большой производственной площади. Этого недостатка лишены многопоточные фильтры 5. Они полностью загружаются фильтрующим материалом, в котором размещаются сборно-распределительные устройства. Как видно из схемы, они позволяют создать несколько (в данном случае три) потоков обрабатываемой воды и увеличить производительность во столько же раз.

Камерные фильтры 4 разделены сплошными перегородками на камеры (в данном примере на две камеры), которые соответствуют двум обычным однослойным фильтрам, работающим параллельно.

С целью повышения скорости фильтрования, получения обработанной воды более высокого качества и увеличения грязеемкости материала в однопоточные фильтры нередко загружают два фильтрующих материала разных насыпной массы и крупности зерен, например дробленый антрацит (0,8 – 1,6 мм) и кварцевый песок (0,5 – 1,0 мм). При этом песок как более плотный материал располагается внизу. Так получают двухслойные фильтры 6, часто используемые на практике.

В радиальном фильтре 7 фильтрующий материал загружается в кольцевой зазор, расположенный между стенкой фильтра и внутренней трубой. Обработанная вода подается в центральную трубу, которой и распределяется по высоте слоя материала. Фильтрование идет по радиусам окружности.

1.4.2.1 Эксплуатация осветлительных фильтров

Работа осветлительных фильтров состоит из трех периодов: полезной работы фильтра по осветлению воды, взрыхляющей промывки фильтра и спуска первого фильтрата в дренаж. Эксплуатация фильтра в межпромывочный период состоит в наблюдении за прозрачностью воды после пропуска ее через фильтр, производительностью фильтра и изменением его гидравлического сопротивления (величиной потери напора).

Для этого на линиях осветляемой и осветленной воды установлены пробоотборные краны и манометры, а на линиях промывочной и осветленной воды – расходомеры.

При снижении прозрачности осветленной воды, а также при достижении максимально допустимой потери напора фильтр выводится из работы на промывку. Промывка фильтра заключается в пропуске через него осветленной воды снизу вверх. Для этого сначала фильтр выключается из работы, а затем подается вода из промывочного бака. Интенсивный поток промывочной воды, поднимаясь, разрыхляет и взвешивает весь фильтрующий слой, расширяющийся при этом на 40-50 %, что дает возможность зернам загруженного фильтрующего материала свободно двигаться в потоке воды и при столкновениях счищать прилипшие к ним частицы шлама и слизи.

Скорость воды при взрыхляющей промывке характеризуется интенсивностью промывки, под которой подразумевается секундный расход воды в литрах через 1 м² сечения фильтра л/(м²·с). Промывка фильтра должна проводиться с такой интенсивностью, которая, обеспечивая вымывание осадков, не приводит к выносу зерен фильтрующего материала. Величина интенсивности промывки зависит от рода материала, размера его зерен, температуры промывочной воды и обычно составляет 15 – 18 л/(м²·с) для кварцевого песка и 10 – 12 л/(м²·с) для дробленого антрацита. Контроль за интенсивностью промывки осуществляется по расходу промывочной воды, измеряемому расходомером. Продолжительность промывки составляет 6 мин. По окончании взрыхляющей промывки первый, мутный фильтрат спускается в канализацию со скоростью 5 м/ч в течение 5-10 мин, после чего фильтр включается в нормальную работу. Во время работы фильтра постепенно заполняется осветленной водой промывочный бак. Продолжительность остановки фильтра на промывку и спуск первого фильтрата со всеми переключениями задвижек составляет около 20 мин.

Скорость фильтрования воды в напорных осветлительных фильтрах, загруженных кварцевым песком или дробленным антрацитом, при предварительной обработке воды в осветлителях составляет 5,0 – 6,5 м/ч, а без предварительной обработки ее 4 – 5 м/ч.

Удельная грязеемкость фильтрующих материалов, в однопоточных фильтрах без предварительной обработки воды перед фильтрами составляет для кварцевого песка 0,75 кг/м³, для дробленого антрацита 1,0 кг/м³. При

предварительной обработке воды в осветлителе удельная грязеемкость соответственно 1,25 и 1,5 кг/м³. С точки зрения экономичности работы установки и удобства обслуживания фильтров продолжительность фильтроцикла должна быть не менее 8 ч, а количество установленных фильтров не меньше трех.

Для уменьшения расхода воды на собственные нужды и повышения эффективности промывки иногда применяются устройства для верхней промывки фильтров, которые представляют собой систему дырчатых труб, уложенных на 50 – 75 мм выше поверхности фильтрующего слоя. Подводимая в устройство промывочная вода, проходя через отверстия, размывает пленку задержанной взвеси.

Эксплуатация осветлительных фильтров значительно облегчается применением автоматической системы управления их работой.

1.4.3 Удаление из воды коллоидных загрязнений

Коагуляцией называется процесс укрупнения (слипания, свертывания) коллоидных частиц, завершающийся выпадением вещества в осадок, удаляемый осаждением или фильтрованием. Процесс, противоположный коагуляции, т.е. переход твердого вещества (например, осадка) в коллоидное состояние, называется *пептизацией*. В технологии водоподготовки под коагуляцией понимают обработку воды специальными реагентами с целью удаления из нее коллоидных и грубодисперсных примесей.

Коллоидные растворы отличаются высокой устойчивостью. Это значит, что коллоидные частички не способны к самопроизвольному соединению в крупные образования и выпадению из раствора, если отсутствуют побудители такого процесса. Причина этого заключается в том, что коллоидные частицы данного вещества несут одноименный электрический заряд, препятствующий их соединению.

Наиболее эффективным способом удаления этих разрядов является взаимная коагуляция двух коллоидов, частицы которых несут разноименные заряды. Реагенты, способные при введении в воду вызывать коагуляцию природных коллоидов, называют *коагулянтами*.

Спустя некоторое время после ввода в пробу определенной дозы коагулянта происходит помутнение воды. С течением времени мутность усиливается, постепенно образуются рыхлые хлопья, оседающие на дно сосуда и увлекающие за собой все загрязнения. Следовательно, видимым эффектом коагуляции является образование осадка в виде рыхлых студнеобразных хлопьев, падающих на дно сосуда. Если это не наблюдается, то коагуляция отсутствует.

В практике водоприготовления в качестве коагулянтов применяют сернокислое железо закисное ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), сернокислый алюминий [$\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$], хлорное железо (FeCl) которые вводятся в воду.

При коагуляции щелочность воды понижается, а концентрация в ней свободной углекислоты повышается.

Результатом коагуляции воды являются увеличение ее прозрачности и снижение окисляемости. Поэтому именно эти показатели и используются для контроля и оценки коагуляционного процесса.

При проведении коагуляции стремятся к тому, чтобы введенное в воду количество коагулянта было в последующем максимально выделено из воды в виде осадка и удалено в осветлителях или в осветлительных фильтрах. В противном случае создается опасность загрязнения ионита и наноса в котельные агрегаты железа или алюминия. Ввиду этого очень важно создать такие условия, при которых введенный в воду коагулянт был бы полностью гидролизован с образованием труднорастворимых гидроокисей.

Процесс коагуляции отличается высокой чувствительностью к условиям, в которых он проводится. На него оказывают влияние реакция среды (рН), доза коагулянта, температура воды и др.

Суть процесса коагуляции заключается в укрупнении наиболее мелких коллоидных частиц и выделении их наряду со взвесями в осадок при добавлении к воде специальных реагентов-коагулянтов.

Наиболее эффективными коагулянтами являются соли алюминия и железа – сульфат алюминия $Al_2(SO_4)_3$, гептагидрат сульфата железа (II) $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ и гексагидрат хлорида железа (III) $FeCl_3 \cdot 6H_2O$.

Расход коагулянта может составлять, например, для сульфата алюминия 30... 150 г коагулянта на 1 м³ воды. Коагуляция протекает наиболее полно при температуре воды 35... 40 °С. В результате коагуляции содержание органических веществ в воде может быть снижено на 60... 80 %, а кремниевой кислоты – на 25...40 %.

1.4.4 Схемы коагуляционных установок

Применяют две принципиально отличные схемы коагуляционных установок: коагуляция в отстойнике и коагуляция на осветлительных фильтрах (прямоточная схема).

Обрабатываемая вода насосом подается в поверхностный теплообменник, где подогревается паром или горячей водой до 30 – 35 °С. Количество воды измеряется расходомером. К дроссельной диафрагме подключены шайбовые дозаторы щелочи и коагулянта (насосы). Образующие осадки задерживаются в осветлительных фильтрах. В некоторых случаях (для труднокоагулируемых вод) перед осветлительными фильтрами устанавливают смеситель. Он представляет собой полый цилиндрический бак, подобный фильтру, в котором вода движется снизу вверх с такой скоростью, чтобы исключить возможность оседания и накопления в нем осадка. Назначение смесителя – обеспечение лучшего перемешивания воды и реагентов, а также увеличить время протекания процесса коагуляции.

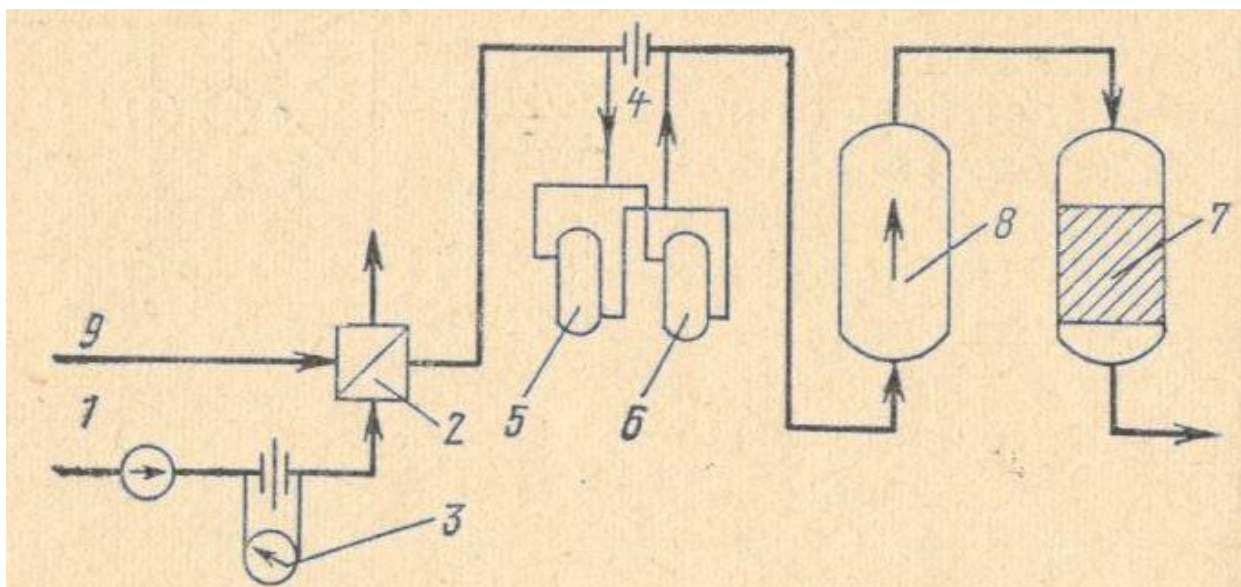


Рисунок 4 – Схема прямоточной коагуляционной установки

1 – насос; 2 – поверхностный теплообменник; 3 – расходомер; 4 – дроссельная диафрагма; 5 – дозатор щелочи (насос); 6 – дозатор коагулянта (насос); 7 – осветительный фильтр; 8 – смеситель; 9 – пар.

1.4.5 Удаление из воды загрязнений в осветлителе методом осаждения

Умягчение воды методом осаждения накипеобразователей заключается в обработке исходной воды такими реагентами, как гашеную известь $\text{Ca}(\text{OH})_2$, углекислый натрий (кальцинированная сода) Na_2CO_3 , едкий натр NaOH , ортофосфат натрия Na_3PO_4 , анионы которых образуют с катионами Ca^{2+} и Mg^{2+} трудно растворимые соединения: карбонат кальция CaCO_3 , гидроксид магния $\text{Mg}(\text{OH})_2$, фосфат кальция и магния $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ и $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$, которые отделяются от умягченной воды сначала в виде осадка в осветлителях, а затем в осветлительных фильтрах.

Методом осаждения не удастся получить достаточно полного умягчения природной воды. Поэтому обычно применяют комбинированные схемы, в которых предварительная обработка воды (предочистка) осуществляется методом осаждения, а окончательная – методом ионного обмена. В этих схемах предочистка используется главным образом для снижения щелочности воды. Для этого применяется обработка воды известью, сочетая ее в необходимых случаях с коагуляцией. Эффективность обработки воды методами осаждения определяется скоростью процесса выделения растворенных в воде веществ в твердую фазу, что связано с процессами кристаллизации. В зависимости от ряда условий процессы кристаллизации могут протекать с различной скоростью. Основным приемом

интенсификации процесса кристаллизации является использование выпавших ранее твердых частиц в качестве центров кристаллизации.

Благодаря своей большой поверхности эти частицы способствуют более быстрому росту кристаллов и их дальнейшему укрупнению, что облегчает процесс отстаивания. Процесс кристаллизации еще более интенсифицируется с повышением температуры и при перемешивании вводимых отдельно воды и реагентов в присутствии ранее выпавшего осадка. Использование осадка в качестве контактной среды при обработке методами осаждения позволяет сократить продолжительность обработки воды, повысить скорости движения ее в аппаратах, уменьшить расход реагентов и улучшить качество обработанной воды.

1.4.6 Схемы известковых установок

Известкование применяется в тех случаях, когда необходимо снизить щелочность исходной воды. Достаточно глубокое умягчение воды при этом не достигается. При известковании карбонатная жесткость (щелочность) исходной воды разрушается, значение ее снижается; происходит удаление из воды магния, удаляется растворенная в воде углекислота; сухой остаток известкованной воды снижается; общая жесткость также уменьшается.

На рисунке 5 приведена схема осветлителя для известкования. Обрабатываемая вода 1, подогретая до заданной температуры, подается в распределительную систему 8, расположенную в воздухоотделителе 14. Освободившись в нем от пузырьков воздуха, она пускается по трубе 10 в тангенциально расположенный ввод 21 и поступает в смеситель 20. Сюда же направляются по радиально расположенным вводам необходимые реагенты: известь 2, коагулянт 3 и флокулянт 4. Такое расположение точек ввода (одна над другой) необходимо для обеспечения благоприятных условий для образования и выделения осадка. Раствор коагулянта может быть введен и в линию обрабатываемой воды 24.

В смесителе протекают все реакции известкования и коагуляции, в результате которых образуется осадок. При дальнейшем восходящем движении воды происходит укрупнение частиц осадка, образование хлопьев и их накопление в некотором объеме, образующем зону взвешенного осадка или слой контактной среды 5 играющей важную роль в работе осветлителя.

Верхний уровень контактной среды располагается примерно на высоте шламоприемных окон 12. Избыток осадка отводится через эти окна в шламоуплотнитель 9, где происходит отстаивание осадка, его уплотнение оседание в нижнюю часть, откуда он в виде концентрированной пульпы непрерывно выводится в дренаж через вентиль 22 или 23. Осветленная вода поднимается вверх шламоуплотнителя и через водозаборное устройство 11 и вентиль 7 отводится в сборный желоб а далее в сеть 6.

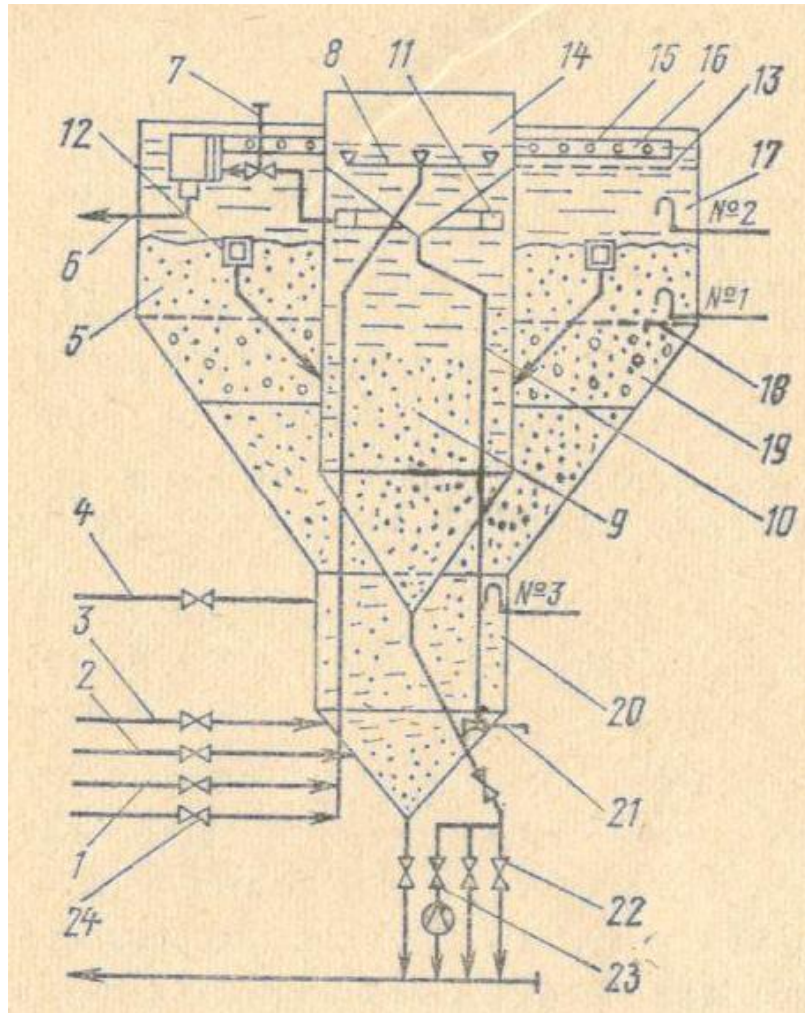


Рисунок 5 – Схема осветлителя для известкования воды

1 – обрабатываемая вода; 2 – подача извести; 3 – подача коагулянта; 4 – подача флокулянта; 5 – слой контактной среды; 6 – сеть; 7, 22, 23 – вентиль; 8 – распределительная система; 9 – шламоуплотнитель; 10 – труба; 11 – водозаборное устройство; 12 – шламоприемные окна; 13, 18 – решетка для равномерного распределения воды; 14 – воздухоотделитель; 15 – отверстие; 16 – водосборный желоб; 17 – зона осветления; 19 – решетка для гашения вращательного движения воды; 20 – смеситель; 21 – ввод; 24 – линия обрабатываемой воды.

В шламоуплотнитель может отводиться 15 – 20 % всего потока воды. Остальная его часть, выйдя из взвешенного осадка, окончательно освобождается взвеси в зоне осветления 17, поступает в водосборный желоб 16 через отверстия 15 и покидает осветлитель.

Решетка 19 служит для гашения вращательного движения воды, решетки 18 и 13 распределяют поток воды равномерно по сечению.

Эксплуатация осветлителей состоит в оперативном управлении режимом его работы с целью получения заданного качества обработанной (известкованной) воды.

1.4.6.1 Способы приготовления известкового молока

Известковым молоком называется взвесь твердых нерастворившихся в воде частичек извести $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в насыщенном известковом растворе. На установках небольшой производительности оно готовится в гидравлических мешалках. Негашеная известь загружается в гасительный бак, заливается водой и оставляется на 2 – 4 часа, в течении которых происходит процесс гашения извести $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{OH})_2$.

Эта реакция идет с выделением тепла (примерно 1170 Дж/кг), вследствие чего при гашении извести происходят разогрев всей массы и испарение воды. Поэтому гасительные устройства стремятся изолировать от других помещений или оборудовать вытяжной вентиляцией. По окончании гашения образовавшееся «тесто» размывают водой и спускают в мешалку. Оставшиеся в гасильном ящике не растворившиеся и невымытые примеси удаляют в отвал. Спущенное в мешалку густое известковое молоко разбавляют водой, размешивают насосом и подают в дозатор.

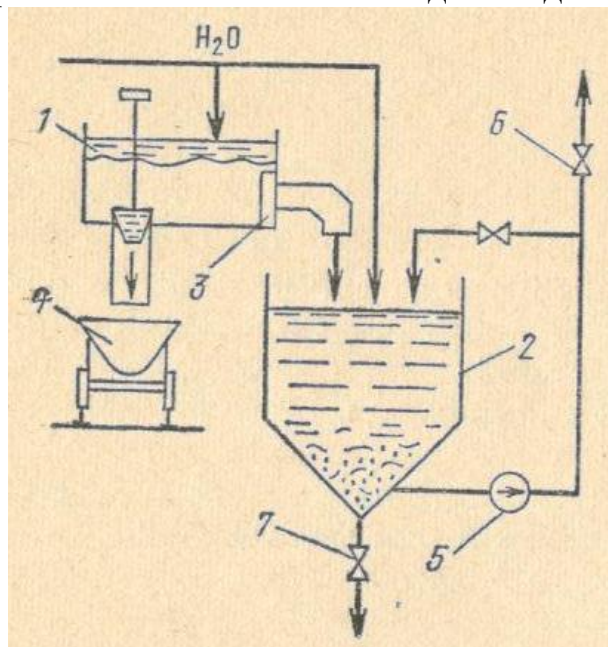


Рисунок 6 – Схема приготовления известкового молока

1 – гасильный бак; 2 – мешалка; 3 – сетка; 4 – вагонетка; 5 – циркуляционный насос; 6 – к дозатору или в сатуратор; 7 – в дренаж.

1.4.6.2 Схема известковой установки

Известковые установки находятся в начале технологического процесса обработки воды. Они готовят воду для последующего основного технологического процесса (умягчения, обессоливания). Такие установки называются известковыми предочистками.

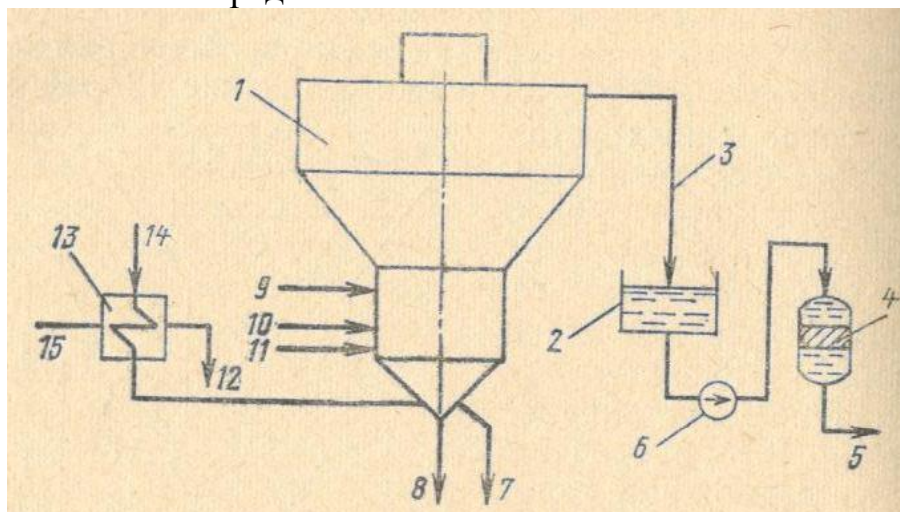


Рисунок 7 – Схема известковой установки

1 – осветлитель; 2 – промежуточный бак; 3 – известкованная вода; 4 – осветлительный фильтр; 5 – ионообменная часть водоочистки; 6 – насос; 7 и 8 – дренажные водопроводы; 9 – флокулянт; 10 – коагулянт; 11 – известь; 12 – конденсат; 13 – теплообменник; 14 – исходная вода; 15 – пар.

Исходная вода *14* поступает в теплообменник *13*, где подогревается до 303 – 313 °К (30 – 40 °С) и направляется в осветлитель *1*. Сюда же направляются необходимые реагенты: известь *11*, коагулянт *10*, и флокулянт *9*. Использовать все три реагента необязательно. Известкованная вода *3* поступает в промежуточный бак *2*, откуда насосами *6* её направляют в осветлительные фильтры *4* и далее в ионообменную часть водоочистки *5*. Подогрев воды ведется паром *15*, конденсат которого *12* направляется в сборные баки. Образующийся осадок выводится из осветлителя через дренажные трубопроводы *7* и *8*.

1.4.6.2.1 Эксплуатация известковых установок

Вода, покидающая осветлитель, должна быть прозрачной и стабильной. Стабильной называется вода, не образующая твердых отложений по пути своего движения. Если эти требования выполняются, то эксплуатация известковой установки признаётся удовлетворительной.

Прозрачность известковой воды по шрифту должна быть не менее 30 см. Количество взвешенных веществ в ней не должно превышать 20 мг/кг. Причинами, препятствующими получению этих показателей, могут быть наклонное расположение водосборных желобов осветлителя, перекрытие

осадком отверстий в распределяющей решетке осветлителя, зарастание отложениями окон отдельных шламоприемных труб. Эти недостатки нарушают равномерное распределение воды по сечению и объему осветлителя. В результате появляются местные высокоскоростные потоки, способствующие выносу взвешенных веществ. Автоматизация работы известковой установки позволяет устранить резкие изменения теплового и нагрузочного режимов.

2 Обработка воды, пара и конденсата

2.1 Обработка воды методом ионного обмена

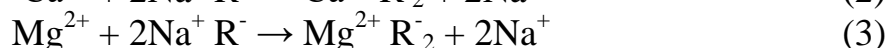
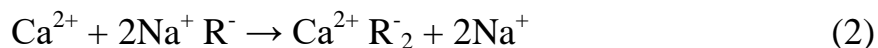
2.1.1 Обработка воды методом катионирования

Катионированием называется процесс обмена катионов между электролитами, растворенными в воде, и твердым нерастворимым веществом, погруженным в эту воду и называемым *катионитом*.

Катион, который отдает катионит в раствор взамен поглощаемых катионов, называется *обменным*. В практике водообработки важными катионами являются: натрий, водород и аммоний. В зависимости от того, каким из этих катионов «заряжен» катионит, различают три процесса: натрий-катионирование (Na- катионирование), водород-катионирование (H-катионирование) и аммоний- катионирование (NH₄-катионирование).

2.1.1.1 Na - катионирование

При натрий-катионировании обменным катионом является натрий. При фильтровании жесткой воды через слой натрий-катионита происходит обмен катионов натрия на кальций и магний.

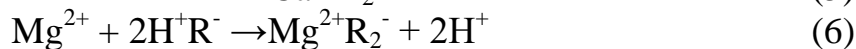
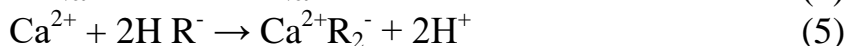


Из этой реакции следует, что при натрий-катионировании изменяется только катионный состав обрабатываемой воды, а присутствующие в ней анионы переходят в обработанную умягченную воду. Следовательно, щелочность обрабатываемой воды не уменьшается, что относится к недостатку этого процесса. Происходит лишь полная замена катионов Ca²⁺ и Mg²⁺ натрием, вследствие чего жесткость натрий-катионированной воды снижается до 10 - 15 мкг - экв /кг и ниже, а сухой остаток несколько возрастает.

После замены всех катионов натрия катионами кальция и магния катионит истощается, т.е. теряет способность умягчать воду. Для восстановления этой способности, необходимо удержанные катионитом катионы удалить и заменить обменным катионом натрия. Этот процесс называется *регенерацией катионита*.

2.1.1.2 Н – катионирование

При водород-катионировании обменным катионом является катион водорода.



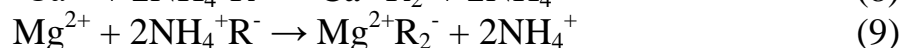
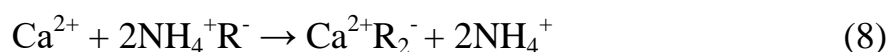
Из этих реакций следует, что при водород-катионировании щелочность обрабатываемой воды полностью удаляется, вследствие чего происходит снижение сухого остатка. Жесткость водород-катионированной воды снижается до 10 - 15 мкг - экв /кг и ниже. Соли кальция и магния, а также натрия и других катионов переходят в свободные кислоты, т.к. все катионы заменяются катионом водорода. Следовательно, водород-катионирование изменяет не только катионный, но и аммонийный состав обрабатываемой воды, т.к. ионы удаляются.

Водород-катионированная вода является кислой и непригодной для питания паровых котлоагрегатов. На водоподготовительных установках процесс водород-катионирования применяется в сочетании с натрий-катионированием или другими процессами. Достоинством водород-катионирования является то, что оно позволяет снижать щелочность исходной воды.

Регенерация истощенного катионита состоит в фильтровании через него 1 – 1,5 %-ного раствора серной кислоты. При этом катионы водорода вытесняют ионы Ca^{2+} и Mg^{2+} , которые переходят в раствор и удаляются из фильтра.

2.1.1.3 Аммоний-катионирование

Этот процесс нашел применение при обработке воды для промышленных котельных. Здесь все катионы, присутствующие в обрабатываемой воде, заменяются при фильтровании её через слой катионита катионом аммония NH_4 .



Таким образом, в умягченной воде присутствуют главным образом соли аммония, вследствие чего жесткость аммоний-катионированной воды делается незначительной.

Регенерация истощенного NH_4 -катионитного фильтра производится сульфатом аммония $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$.

В зависимости от схемы аммоний – натрий – катионитной установки (параллельное или совместное катионирование) регенерационный раствор содержит либо один сернокислый аммоний, либо смесь $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ и NaCl в определенном соотношении. Основным недостатком рассматриваемого процесса является значительное обогащение пара аммиаком, большие концентрации которого в конденсате при одновременном присутствии кислорода вызывают коррозию медных сплавов. Способ этот получил ограниченное применение.

2.1.2 Характеристика и свойства катионитов

В настоящее время на отечественных электростанциях широкое применение нашли катиониты: сульфуголь, КУ-1 и КУ-2-8. Первый из них получается путем обработки коксующегося угля дымящейся серной кислотой, КУ-1 и КУ-2-8 являются синтетическими материалами.

Катиониты характеризуются рядом показателей их качества, из которых основными являются: *рабочая обменная емкость, фракционный состав (размер зерен), насыпная масса, коэффициент набухания, термостойкость* и др. Рабочая обменная емкость катионита является наиболее важным показателем. Значение ее зависит от некоторых свойств катионита и условий его работы.

Рабочая обменная емкость сульфуголя при водород- катионировании зависит главным образом от состава исходной воды. Анионный состав воды, не оказывающий при натрий-катионировании существенного влияния ни его рабочую емкость, приобретает при водород-катионировании решающее значение.

В этом случае рабочая емкость сульфуголя увеличивается с ростом удельного содержания иона HCO_3^- в исходной воде, т. е. с ростом отношения эквивалентна количеств: $(\text{HCO}_3^-) : (\text{HCO}_3^-) + (\text{SO}_4^{2-}) + (\text{Cl}^-) + (\text{NO}_3^-)$.

Рабочая обменная емкость зависит также от концентрации в умягченной воде катионов, одноименных обменному. Увеличение ее обуславливает снижение обменной емкости. Это означает, что исходные воды с высоким (≥ 800 мг/л) солесодержанием нельзя глубоко умягчить в одном фильтре при экономически приемлемом расходе реагентов на регенерацию.

Причина этого заключается в так называемом противоионном эффекте, сущность которого сводится к следующему. При фильтровании воды с высокой концентрацией солей через слой, например, натрий-катионита, в ней по мере движения сверху вниз будет нарастать концентрация ионов Na^+ за счет замены ими катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} . В нижней части слоя катионита концентрация ионов Na^+ достигает своего максимума. Увеличение концентрации противоиона (в данном случае Na^+) подавляет диссоциацию катионита, что обуславливает торможение процесса ионного обмена. При водород-катионировании такое торможение увеличивается при уменьшении

доли иона HCO_3^- в общей сумме анионов, присутствующих в обрабатываемой воде.

Существенное влияние на значение обменной емкости катионита оказывает природа поглощаемых катионов. Любой катион может поглощаться катионитом полностью, однако рабочая емкость будет зависеть при этом от природы катиона. В ряду $\text{Na}^+ < \text{NH}_4^+ < \text{K}^+ < \text{Mg}^{2+} < \text{Ca}^{2+}$ каждый последующий катион поглощается более интенсивно, чем предыдущий. В соответствии с этим рабочая обменная емкость сульфогля по натрию примерно в 1,5 раза меньше, чем по кальцию (соответственно 180 и 280 г-экв/м³). Для катионитов КУ-1 и КУ-2 обменная емкость по Na и Ca отличается незначительно.

Для вышеприведенного ряда катионов справедливо и обратное: каждый предыдущий катион будет вытесняться из катионита последующим, если они присутствуют в растворе в сопоставимых концентрациях. Это обстоятельство накладывает на процесс катионирования некоторую особенность.

Катиониты при погружении в воду набухают, т. е. объем их увеличивается. Степень этого увеличения определяется значением коэффициента набухания. В связи с этим различают насыпную массу (т/м³) катионита: товарного, набухшего в воде, сухого.

Набухаемость катионитов следует учитывать при загрузке ими фильтров. В противном случае слой катионита будет весьма большим и ионит будет выноситься из фильтра при взрыхлении.

Сульфуголь в воде с $\text{pH} \leq 7,5$ может работать при температуре ≤ 1353 °К без заметной пептизации. При $\text{pH} \geq 8,3$ и $t \geq 343$ °К он пептизуется, окрашивая фильтрат в желтоватый цвет.

Катионит КУ-1 более термостоек, КУ-2-8 в водородной форме выдерживает температуру 383 – 393 °К. Численные значения некоторых показателей катионитов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Показатели качества катионитов (таблица взята из Справочника химика-энергетика. т. 1 М.: Энергия, 1972.)

Марка катионита	Размер зерен, мм	Насыпная масса катионита, т/м ³		Объемная емкость, г-экв/м ³		Влажность товарного катионита, %	Коэффициент набухания катионита K _{НАБ}	
		товарного	набухшего в воде	Na-форма	H-форма		сухого	товарного
Сульфуголь	0,3 – 1,5	0,65	0,82	350	270	≤ 30	1,8	1,25
KY-1	0,3 – 1,5	0,7	0,7	350	350	50 – 60	2,0	1,0
KY-2-8	0,3 – 1,25	0,75	0,75	950	650	50 – 60	2,1	1,0

Катионит KY-2-8 по своим свойствам и качеству близок к следующим зарубежным маркам: Амберлит IR-120, Дауэкс (США), Зеролит-225 (Англия), Вофатит KPS-200 (ГДР), Варной KS (ВНР) и др.

2.1.3 Работа и регенерация ионитных фильтров

2.1.3.1 Работа ионитных фильтров

Работа ионитного фильтра состоит из двух периодов: рабочего, когда происходит ионирование обрабатываемой воды, и регенерации. Для большей ясности изложения рассмотрим работу натрий-катионитного фильтра, производящего умягчение воды. Все основные выводы, полученные при этом, будут справедливы и для других процессов ионирования.

Слой катионита, в котором начинается и заканчивается умягчение воды, называется работающим слоем или зоной умягчения, высота которой зависит от многих факторов.

В процессе работы фильтра верхние слои работающей зоны истощаются и теряют способность к ионному обмену. На смену им вступают в работу свежие слои катионита, расположенные ниже. Таким образом, зона умягчения постепенно опускается вниз. Спустя некоторое время после начала работы фильтра в слое катионита образуются три зоны: работающая, истощенного и свежего катионита.

Фильтр включается в работу при заданной весьма малой жесткости, значение которой остается практически постоянным до момента совмещения работающей зоны с нижним слоем катионита. В момент совмещения появляется «проскок» катионов накипеобразователей (т.е. в фильтрате появляется и в дальнейшем увеличивается концентрация катионов Ca²⁺ и Mg²⁺) и жесткость умягченной воды начинает возрастать, пока не станет равной жесткость исходной воды. Это будет означать полное истощение катионита. Поскольку целью Na-катионирования воды является ее

умягчение, то фильтр выводится из работы на регенерацию, т.е. до существенного увеличения жесткости фильтрата.

Межрегенерационный период должен находиться в пределах 12 ч. Для малых установок может допускаться и до 24 ч.

Работа катионитного фильтра продолжается до момента истощения, что определяется жесткостью (или другим показателем) обработанной воды. Истощенный фильтр выводится из работы и регенерируется.

2.1.3.2 Прямоточная регенерация ионитных фильтров

Прямоточной называется регенерация, при которой обрабатываемая вода и раствор реагента пропускаются через слой ионита в одном и том же направлении – сверху вниз или наоборот. При регенерации ионитного фильтра выполняют последовательно следующие операции: взрыхление, регенерацию, отмывку фильтра в дренаж и отмывку в бак. В некоторых случаях две последние операции составляют одну – отмывку фильтра в дренаж.

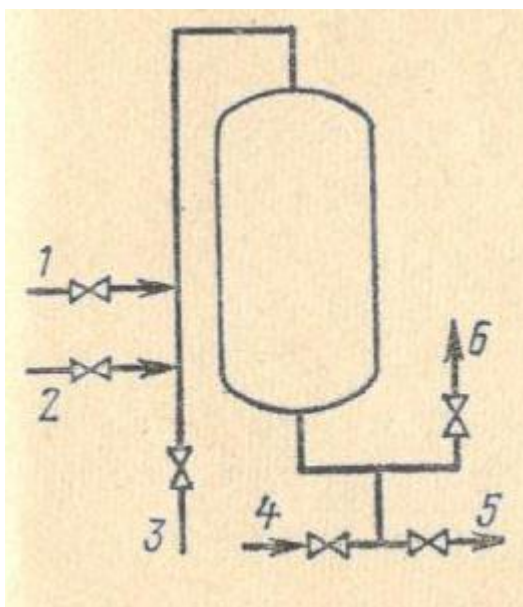


Рисунок 8 – Прямоточная регенерация ионитного фильтра

Взрыхление является первой технологической операцией и состоит в том, что промывная вода через вентиль 4 (рисунок 8) подается в ионитный фильтр. Пройдя слой ионита снизу вверх, промывная вода сбрасывается в канализацию через задвижку 3, которая медленно открывается настолько, чтобы была обеспечена заданная интенсивность взрыхления. Взрыхление приводит ионит во взвешенное состояние и предназначено для устранения местных уплотнений в его слое, образовавшихся за предыдущий фильтроцикл и нарушающих гидродинамику фильтра, а также для удаления занесенных водой загрязнений и продуктов разрушения частиц катионита. Для этого необходимо взрыхление вести с определенной интенсивностью,

которая находится в пределах 3,0 – 4,0 л / (м²-с) (линейная скорость 9 – 13 м/ч). Длительность операции взрыхления составляет 10 – 15 мин.

После окончания взрыхления производится операция регенерации фильтра. Она заключается в том, что в фильтр подается в необходимом количестве и определенной концентрации раствор регенерирующего реагента, который фильтруется сверху вниз через слой катионита. Регенерация производится открытием задвижек 1 и 5. Регенерирующий раствор, прошедший фильтр, сбрасывается в дренаж. Скорость пропуска его через слой катионита обычно равна для раствора соли 4 – 5 м/ч и серной кислоты 9 – 10 м/ч. Натрий-катионитные фильтры регенерируются 6 – 8%-ным раствором NaCl, водород-катионитные – 1 – 1,5%-ным раствором H₂SO₄.

При расчетах можно принимать для NaCl 180 – 200 и для H₂SO₄ 80 – 100 г/г-экв. Значение расхода регенерирующего реагента существенно сказывается на обменной емкости катионита и остаточной концентрации поглощаемого иона в фильтрате.

После подачи в фильтр всего раствора реагента и пропуска его через слой катионита, на что затрачивается около 20 – 30 мин, приступают к осуществлению третьей операции – отмывке фильтра. Для этого задвижку 1 закрывают и открывают задвижку 2. Отмывку ведут со скоростью 4 – 5 для соли и 9 – 10 м/ч для кислоты. Когда качество воды, выходящей из фильтра, будет отвечать установленным нормам, задвижку 5 закрывают, открывают задвижку 6 и фильтр включают в работу. Общая длительность процесса регенерации ионитного фильтра составляет 1,5 – 2 ч и более.

2.1.3.3 Противоточная регенерация ионитных фильтров

Процесс регенерации имеет существенное значение в улучшении работы ионитных фильтров. Он должен обеспечить по возможности полное удаление из ионит _ поглощенных за предыдущий фильтроцикл ионов при минимальном расходе реагента.

Однако, как показывает опыт, достигнуть этого при обычно практикуемом прямоточном способе регенерации практически невозможно, так как не удастся полностью удалить из нижних слоев ионита задержанные им ионы (например, Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺), как это показано схематично на рисунке 9. При последующем фильтровании обрабатываемой воды через этот фильтр оставшиеся катионы будут вытеснены ионом водорода, содержащимся в первых портах: H-катионированной воды, перейдут в нее и ухудшат качество.

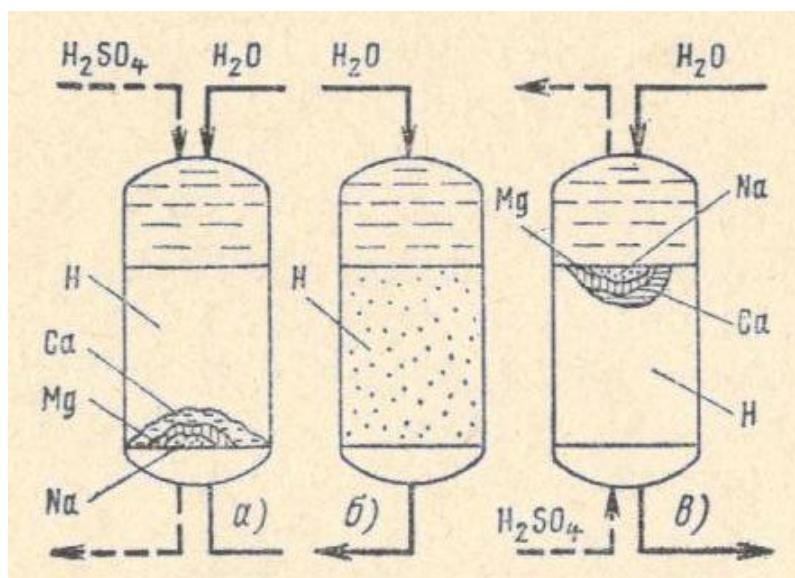


Рисунок 9 – Способы регенерации водород-катионитного фильтра

а – прямоточный; б – прямоточный с перемешиванием ионита; в – противоточный.

Способ регенерации ионита большим избытком реагента, для достижения больших значений, не может быть рекомендован из-за своей неэкономичности и большого сброса реагентов со сточными водами. Второй способ состоит в том, что после прямоточной регенерации слой ионита перемешивают сжатым воздухом, водой или их смесью. В этом случае невывесенные из нижних слоев ионита ионы рассеиваются по всему объему (рисунок 9, б) и выходные слои ионита оказываются как бы глубоко регенерированными. Третьим, наиболее эффективным является способ противоточной регенерации (рисунок 9, в): кислота пропускается снизу вверх, обрабатываемая вода – в обратном направлении, при этом нижние слои ионита имеют высокую степень регенерации. Чтобы получить в случае противотока большое значение на выходе воды из фильтра, необходимо отмывку ионита после регенерации проводить обработанной водой, раствор реагентов готовить также на этой воде. В противном случае преимущества противоточной регенерации будут утеряны. При правильной реализации этот способ позволяет при минимальном расходе реагентов получить высокое качество обработанной воды.

2.1.4 Устройство ионитных фильтров

На рисунке 10 изображен вертикальный напорный однослойный однопоточный ионитный фильтр первой ступени. Он представляет собой цилиндрический резервуар *б* с эллиптическими днищами *2* и *4*, в центре которых сделаны отверстия для ввода и удаления воды.

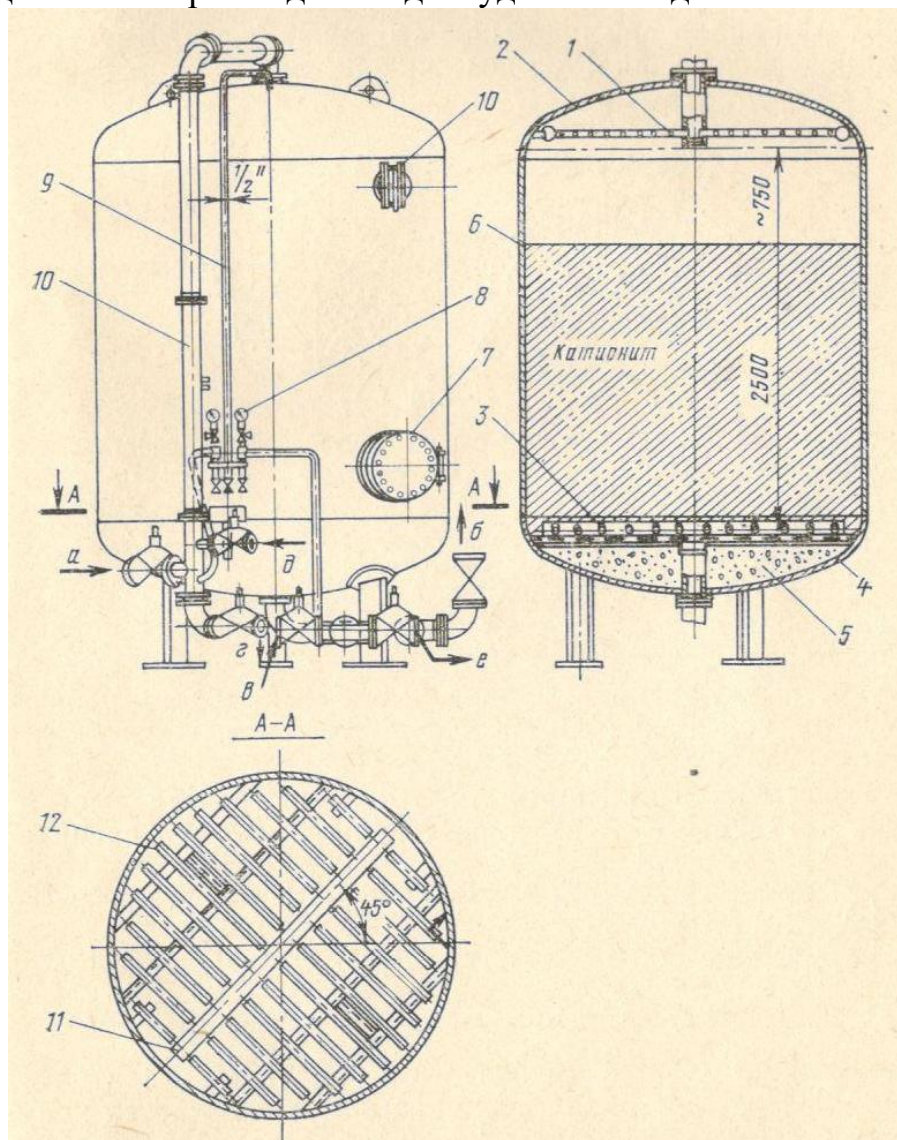


Рисунок 10 – Катионитный фильтр

а – вход обрабатываемой воды; *б* – выход обрабатываемой воды; *в* – промывочной воды; *г* – сброс промывочной воды; *д* – подвод раствора реагента; *е* – сброс отмывочной воды.

Отвод воздуха из фильтра осуществляется трубкой *9*. Манометры *8* служат для измерения давления до и после фильтра; разность их показаний дает потерю напора *в*, фильтре. Люк *10* служит для осмотра фильтра и ионита, а *7* – для ревизии и ремонта нижнего распределительного устройства. Пространство над слоем катионита во время работы фильтра заполнено

водой и называется «водяной подушкой». Оно необходимо для расширения слоя материала при промывке его снизу вверх. Внутренняя поверхность фильтра должна защищаться коррозионно-стойким покрытием. Внутри фильтра расположены сборно-распределительные устройства – верхнее 1 и нижнее 3. Они предназначены для равномерного распределения и сбора по площади фильтра воды. Чем меньше степень неравномерности при распределении или сборе воды по сечению фильтра, тем лучше работает фильтр, тем выше его технико-экономические показатели.

Конструкции распределительных устройств могут быть различными. В настоящее время наиболее распространено устройство трубчатого типа. На горизонтальную плоскость бетонной «подушки» 5 укладывается коллектор 11, к которому присоединяются распределительные трубы 12, имеющие отверстия. Для того чтобы мелкий ионит не уходил через эти отверстия, они накрываются щелевым желобком (рисунок 11).

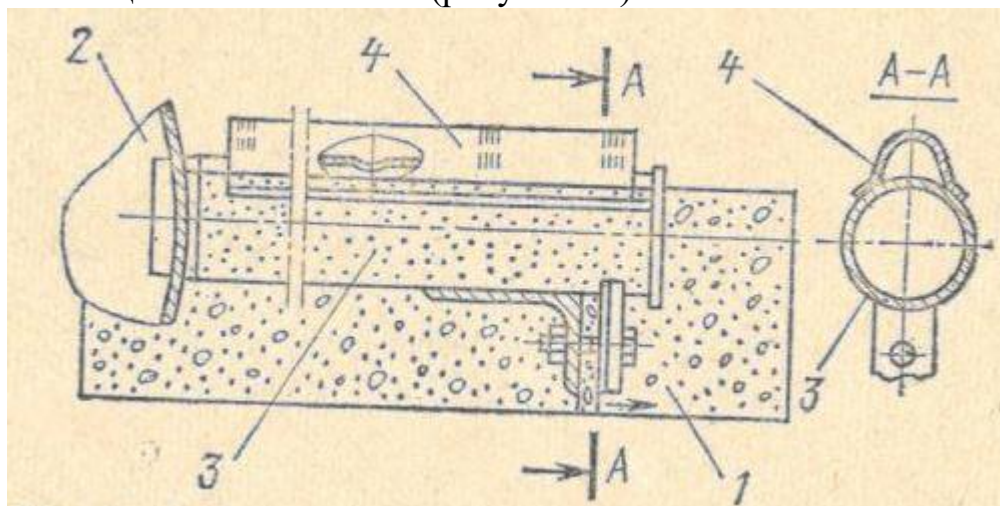


Рисунок 11 – Деталь нижнего распределительного устройства

1 – бетонная подушка; 2 – коллектор; 3 – распределительная труба; 4 – желобок со щелями 0,4 мм.

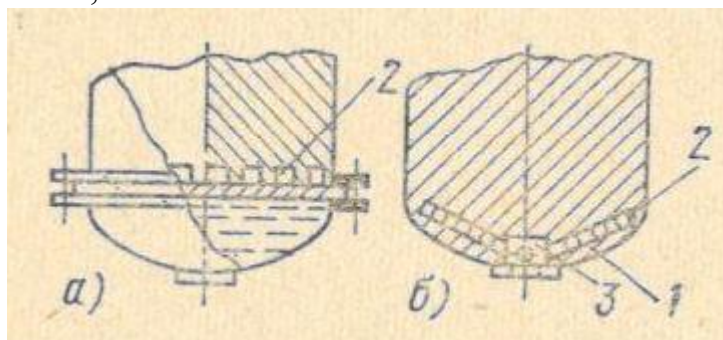


Рисунок 12 – Нижние распределительные устройства

а – «ложное дно»; б – «копирующее дно»; 1 – коллектор; 2 – распределительная труба; 3 – распределительный короб.

На рисунке 12,*а* изображено распределительное устройство типа «ложное дно». Оно состоит из прочной полимерной доски, зажатой между фланцами. Доска имеет отверстия, в которые вставляются щелевые колпачки. Такое распределительное устройство имеет перед трубчатым ряд преимуществ — меньшее гидравлическое сопротивление, большая степень равномерности распределения, большая коррозионная стойкость и др. На рисунке 12,*б* представлено «копирующее» форму днища устройство трубчатого типа. Достоинство его состоит в том, что оно не требует устройства бетонной подушки.

2.1.5 Типы ионитных фильтров

2.1.5.1 Ступени обработки воды

Обрабатываемая вода на водоподготовительных установках проходит последовательно несколько фильтров разного назначения. Различают фильтры первой, второй и третьей ступеней. Катионитные фильтры первой ступени (H_1 , Na_1) являются первыми, на которые подается обрабатываемая вода после осветлительных фильтров. Они, следовательно, несут наибольшую ионную нагрузку. Поэтому они имеют большую высоту и более высокий слой катионита (2 – 2,5 м). Катионитные фильтры второй ступени и анионитные фильтры имеют слой ионита 1,5 м. Анионитные фильтры первой ступени (A_1) также несут основную ионную нагрузку. Фильтры второй ступени (H_2 , Na_2 , A_2) удаляют из воды ионы, оставшиеся после фильтров первой ступени. Если требования к качеству обработанной воды весьма высоки, ставятся фильтры третьей ступени (H_3 , A_3) или фильтры смешанного действия (ФСД). Фильтры третьей ступени или ФСД удаляют остатки ионов. Для того чтобы фильтры второй и третьей ступеней успешно выполняли свои функции, они должны глубоко регенерироваться, работать в области малых ионных нагрузок и полностью не истощаться.

2.1.5.2 Фильтры большой единичной производительности

Производительность фильтра определяется произведением скорости на площадь фильтрования. Следовательно, для повышения производительности необходимо увеличить скорость и площадь фильтрования или обе эти величины. Увеличение скорости ионитных фильтров ограничено гидравлическим сопротивлением слоя ионита и длительностью работы фильтра между регенерациями. С увеличением скорости фильтрования растет гидравлическое сопротивление слоя ионита и уменьшается длительность работы фильтра между регенерациями, в то время как желательна низкое значение гидравлического сопротивления и высокая длительность работы фильтра.

Для фильтров, несущих основную ионную (или грязевую) нагрузку (первая ступень), более приемлемым является увеличение поверхности фильтрования. Для осуществления этого предложены следующие способы:

- организация в фильтрах многих потоков воды (многопоточные фильтры),
- устройство в фильтре нескольких камер, работающих параллельно (многокамерные фильтры);
- фильтрование обрабатываемой воды по радиусам окружности фильтра (радиальные фильтры).

2.1.5.3 Многопоточные фильтры

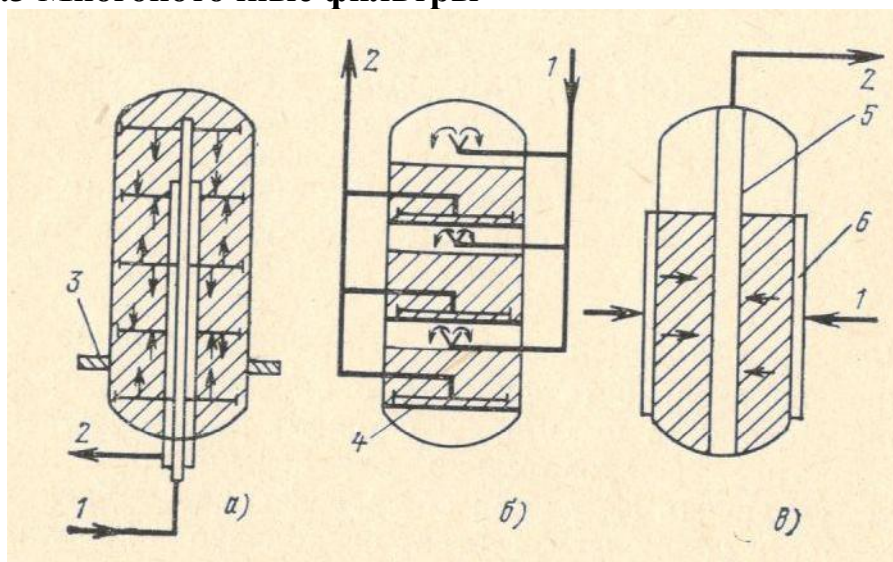


Рисунок 13 – Фильтры большой единичной производительности

а – многопоточный; б – многокамерный; в – радиальный; 1 – исходная вода; 2 – обрабатываемая вода; 3 – крыша здания; 4 – сплошные металлические перегородки; 5 – труба; 6 – цилиндр фильтра.

Многопоточный фильтр (рисунок 13,а) отличается от обычного (однопоточного) тем, что он не имеет водяной подушки, которая заполняется фильтрующим материалом. Внутри последнего concentрически по оси расположены два главных коллектора: подающий исходную воду 1 и отводящий обработанную 2. По высоте слоя на равных расстояниях друг от друга горизонтально расположены сборно-распределительные устройства, из которых нечетные подают, а четные отводят из фильтра воду. Ввиду этого верхнее и нижнее распределительные устройства имеют в два раза меньшую нагрузку, чем средние. Такое устройство фильтра позволяет организовать в общем слое материала несколько отдельных потоков обрабатываемой воды. На рисунке 13,а представлен четырехпоточный фильтр, равный по производительности четырем однопоточным того же диаметра. Преимущество такой конструкции состоит еще и в том, что сам фильтр

может быть расположен над крышей 3 здания, которое в этом случае необходимо для размещения в нем узла управления фильтром. При таком расположении количество потоков может быть существенно увеличено. Регенерация ионита может производиться в фильтре по схеме противотока без операции взрыхления, что дает дополнительное преимущество этому типу фильтра (многопоточно-противоточный). Периодически (один раз в 1 – 2 месяца) при возникновении необходимости фильтрующий материал выгружается в регенератор, где и производится его промывка, отмывка от мелочи и регенерация. При использовании многопоточного фильтра в качестве осветлительного промывка фильтрующего материала осуществляется в выносном регенераторе.

2.1.5.4 Многокамерные фильтры

В многокамерном фильтре (рисунок 13,б) его объем по высоте делится сплошными металлическими перегородками 4 на отдельные камеры, каждая из которых представляет собой обычный однопоточный фильтр с водяной подушкой. Ввиду этого при одной и той же высоте корпуса фильтра число размещаемых в нем камер будет меньше числа потоков и, следовательно, производительность его будет меньше многопоточного. Однако он не нуждается в выносном регенераторе.

2.1.5.5 Радиальные фильтры

В радиальном фильтре (рисунок 13,в) по вертикальной оси фильтра располагается труба 5, несущая на себе сборно-распределяющее устройство. Такое же устройство располагается и на цилиндре фильтра б. В кольцевое пространство между корпусом фильтра и трубой 5 загружается фильтрующий материал (ионит, сульфуголь, антрацит). Обработываемая вода 1 поступает в радиальном направлении снаружи внутрь фильтра (или наоборот) и по трубе 5 отводится в сеть 2. Для надежной работы этих фильтров, требуется, однако, подавать в фильтр обработанную воду для зажатия слоя фильтрующего материала. В этом фильтре скорость фильтрования непостоянна, она возрастает от периферии к центру.

2.1.5.6 Фильтры непрерывного действия

Ионитные фильтры непрерывного действия (ИФНД) появились в результате стремления конструкторов и исследователей создать высокопроизводительное оборудование для обработки воды. Непрерывный процесс копирования позволяет работать с большими скоростями фильтрования (до 100 м/ч) и с минимальным расходом реагентов, получать высокое качество обработанной воды и требует относительно малого объема ионита. В настоящее время существует много схем и конструкций фильтров непрерывного действия. В одних из них ионит перемещается по замкнутому циклу непрерывно, в других – периодически, в третьих – ионит остается

неподвижным, а перемещаются потоки воды и реагента. Все эти схемы имеют свои достоинства и недостатки. Наибольшую известность приобрели установки непрерывного действия японской фирмы «Асахи» и французской «Дегремонт», которая усовершенствовала японский вариант. В России разработан аналогичный вариант, схематично представленный на рисунке 14.

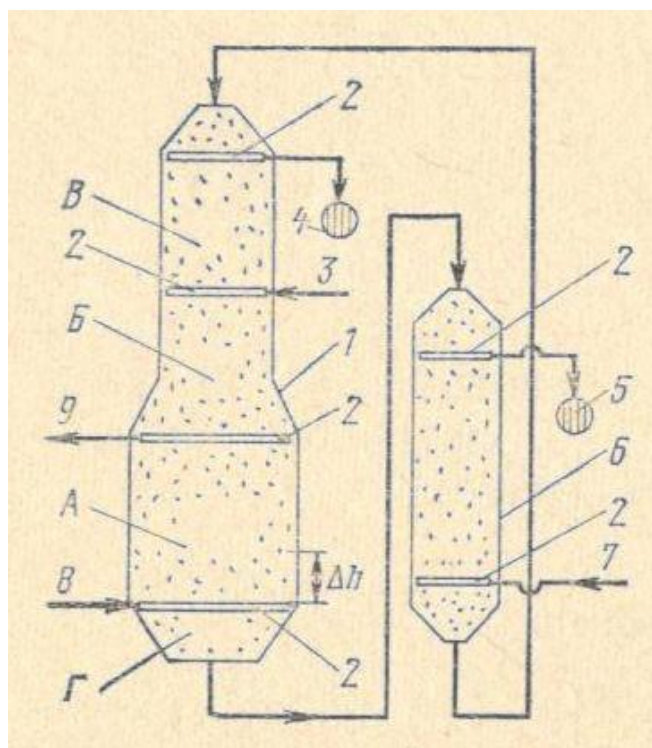


Рисунок 14 – Ионитный фильтр непрерывного действия

1 – основная колонна; 2 – распределительное устройство; 3 – ввод реагента; 4,5 – дренаж; 6 – вспомогательная колонна; 7 – промывочная вода; 8 – исходная вода; 9 – фильтр.

Ионитный фильтр непрерывного действия (ИФНД) обычно состоит из нескольких отдельных аппаратов, предназначенных для выполнения в схеме отдельных функций (регенерация, отмывка, ионирование и др.), которые частично или полностью объединены в одном аппарате. В описываемом варианте (рисунок 14) две колонны: основная 1 и вспомогательная 6. В колонне 1 распределительными устройствами 2 обособлены четыре зоны – обработки (например, умягчения) воды А, отмывки ионита от продуктов регенерации В, регенерации В и перегрузки Г.

Колонна 6 предназначена для отмывки ионита от мелочи и загрязнений. Помимо колонн в схему установки входит реагентное хозяйство, насосы и трубопроводы. Каждый ИФНД представляет собой автономный агрегат высокой производительности. Все операции автоматизируются, так как на ручном управлении ИФНД работать не может.

Представленный на рисунке 14 ИФНД работает следующим образом. Исходная вода 8 с расходом Q_H , м³/ч, подается вниз аппарата, проходит зону *A* и покидает фильтр 9 в количестве Q_K . Разность $Q_H - Q_K$, м³/ч, поступает в зону *B* и далее в зону *B*. В конце зоны *B* в фильтр вводится раствор реагента 3. Отработавший раствор удаляется в дренаж 4. Важно отметить, что работающий слой ионита *A* зажат и что регенерация его в зоне *B* происходит достаточно полно. Ввиду этих особенностей представляется возможным работать с высокими скоростями и получать хорошее качество обработанной воды.

По истечении определенного времени (примерно 20 – 40 мин), когда произошло истощение слоя ионита на некоторую высоту Ah , работа фильтра прерывается на 20 – 30 с. За это время отработавший объем ионита $v_{от}$ поступает в камеру *Г*, освободившийся объем в камере *A* заполняется отрегенированным ионитом из камеры *B*, которая потом заполняется отрегенированным, но неотмытым ионитом из камеры *B*. По завершении этих операций фильтр включается в работу. Вслед за этим истощенный ионит из камеры *Г* гидравлически перемещается в колонну 6 для отмывки от мелочи. Соответствующий объем ионита подается в колонну 1. Промывочная вода 7 вместе с загрязнениями удаляется в дренаж 5. На этом заканчивается один цикл и начинается другой.

2.1.5.7 Противоточные фильтры

Основное затруднение при осуществлении противоточного ионирования состоит в том, что поток жидкости, направленный снизу вверх, расширяет слой ионита, что значительно ухудшает процесс ионообмена и является недопустимым. Поэтому противоточные фильтры должны иметь специальные устройства или схему, которые устраняют этот недостаток. В настоящее время предложено и запатентовано много таких устройств.

На рисунке 15 приведено несколько схем противоточных фильтров. В схеме на рисунке 15,а слой ионита называется гидравлически зажатым, так как поток раствора реагента, направляемый снизу вверх, выходит из фильтра через среднее распределительное устройство 1, погруженное на 200 – 400 мм в слой ионита. Последний не может расширяться, поскольку нет протока через водяную подушку. Однако в действительности зажатие не совсем надежно, так как поток жидкости может направляться через водяную подушку, как это указано на рисунке стрелками.

Более надежные результаты получаются при «блокировке» слоя ионита небольшим потоком обработанной воды 3, направляемым во время регенерации и удаляемым через устройство 1.

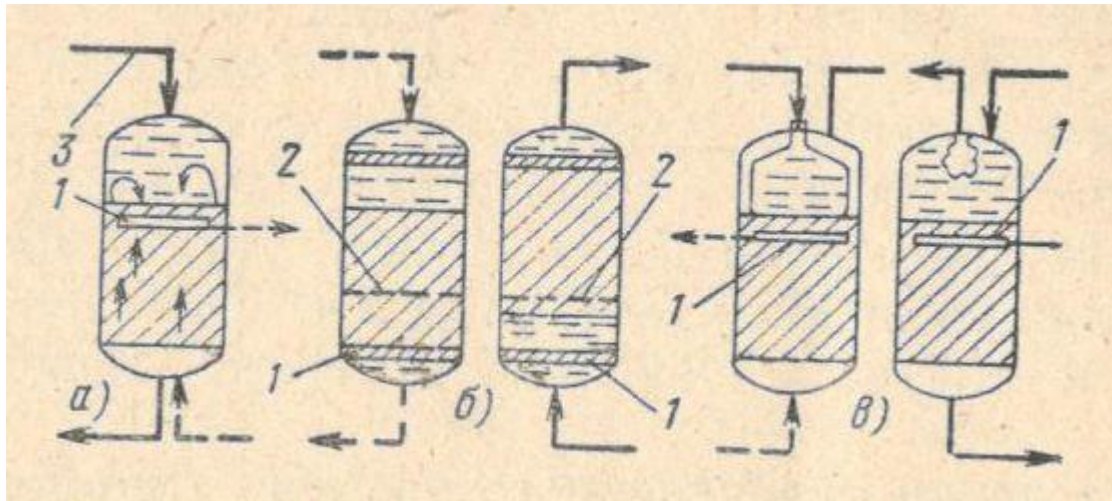


Рисунок 15 – Схемы противоточных фильтров

1 – распределительное устройство; 2 – решетка; 3 – поток обработанной воды.

В схеме на рисунке 15,б регенерация производится потоком раствора реагента, направленным сверху вниз. Обрабатываемая же вода с достаточно большой скоростью подается снизу вверх, поднимает и прижимает ионит к верхнему распределительному устройству. Решетка 2 облегчает зажатие материала. В схеме на рисунке 15,в для зажатия слоя в объем водяной подушки вводится «колба» из эластичного материала. При регенерации снизу вверх «колба», в которую подается под давлением обрабатываемая вода, увеличивается в размерах и препятствует расширению ионита. Отработавший раствор реагента выводится из фильтра через среднее распределительное устройство 1. При работе фильтра вода вытесняется из колбы, объем которой резко уменьшается и не влияет на процесс ионирования.

На рисунке 16 приведена схема ступенчато-противоточного ионитного фильтра. Основная идея ее состоит в том, что небольшая часть ионита, с которой вода контактирует на выходе из фильтра, должна быть глубоко отрегенирована. Для этого весь объем ионита размещается в двух сосудах разной емкости: примерно $\frac{2}{3}$ в сосуде 1 и около $\frac{1}{3}$ в сосуде 2. Обрабатываемая вода поступает в сосуд 1 (первая ступень) в направлении сверху вниз (прямоток), по выходе из которого она направляется в сосуд 2 (вторая ступень) противотоком (снизу вверх). Во второй ступени скорость воды равна не менее 30 м/ч, вследствие чего слой ионита поднимается вверх и прижимается к верхнему днищу, чем и достигается надежное его зажатие.

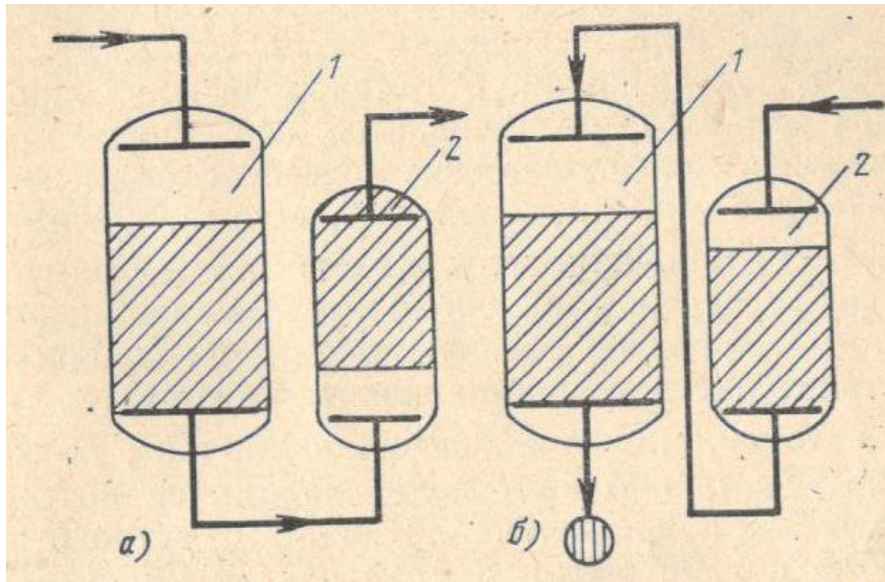


Рисунок 16 – Ступенчато-противоточный ионитный фильтр

а – работа; б – регенерация.

При регенерации раствор реагента, необходимый для регенерации всего объема ионита, направляется вначале во вторую ступень сверху вниз, а затем в первую ступень в том же направлении. Отмывка второй ступени осуществляется обработанной водой. Удельный расход реагентов на этих фильтрах существенно снижается и достигает 1,3 – 1,5 г-экв/г-экв при высоком качестве фильтрата.

2.1.6 Эксплуатация катионитных фильтров

Эксплуатация катионитных фильтров имеет своей задачей получение воды заданного качества при минимально возможном расходе реагентов. Как указывалось выше, для наиболее полного удаления из воды катионов, в частности для умягчения воды, необходимо, чтобы катионит, с которым обрабатываемая вода контактирует на выходе из фильтра, был отрегенирован наиболее полно.

Перед регенерацией слой катионита обычно взрыхляют, т. е. потоком воды снизу вверх ионит разрыхляют, он расширяется и занимает почти весь объем фильтра. Эта операция обосновывается тем, что она способствует удалению из слоя ионита загрязнений и измельченных фракций ($\leq 0,3$ мм). Между тем опыт показывает, что взрыхление перед каждой регенерацией совсем не обязательно. Если обрабатываемая вода содержит мало механических загрязнений, а гидравлическое сопротивление слоя ионита не увеличивается, взрыхление можно не производить долго. Оно делается необходимым при гидравлическом сопротивлении слоя ионита, превышающем $(1\div 2) \cdot 10^5$ Па, или при снижении общей обменной емкости фильтра. Последнее наблюдается обычно тогда, когда по разным причинам

гидродинамическая характеристика слоя катионита ухудшается (комкование материала; возникновение «каналов», по которым преимущественно идет вода; попадание посторонних предметов; повреждение дренажного устройства и т. п.). Радикальной мерой в этом случае является ревизия фильтра с выгрузкой материала.

Для обеспечения экономичной работы катионитной установки необходимо, чтобы рабочая обменная емкость катионита не снижалась, т. е. находилась на своем верхнем уровне. В условиях эксплуатации это требование нередко не выполняется, и фильтры ухудшают показатели своей работы. Причины этого разнообразны. Одна из них связана с неудовлетворительным протеканием процесса коагуляции воды на осветлительных фильтрах (прямоточные схемы). Сущность этого состоит в том, что при неполном гидролизе алюминиевого коагулянта становится возможным выделение на зернах катионита гидроокиси алюминия, обволакивающей их и изолирующей от воды. В этом случае заметно снижается обменная емкость и, следовательно, производительность установки. Возникает также перерасход реагента. К аналогичным результатам приводит отложение на зернах катионита карбоната кальция, наблюдавшееся на известково-катионитных установках с нестабильной после известкования водой.

Образовавшиеся в слое катионита отложения удаляются промывкой его раствором кислоты.

Образующаяся в процессе коагуляции CO_2 понижает рН воды, т. е. увеличивает концентрацию ионов водорода. Последние, обладая способностью к катионному обмену, вступают в реакцию с натрий-катионитом, отвлекая на себя часть обменной емкости, уменьшая рабочую обменную емкость по Ca^{2+} и Mg^{2+} . Поэтому с целью повышения обменной емкости в подобных условиях прибегают к двум мерам: либо связывают выделяющуюся CO_2 подщелачиванием воды перед катионитными фильтрами едким натром, либо удаляют углекислоту продуванием воды воздухом. Последнее удобно осуществить при открытой схеме дозирования коагулянта в бак перед насосами сырой воды, в котором и производится продувание воды воздухом. Снижение обменной емкости катионита может происходить и по другим причинам. Среди них следует отметить неравномерное фильтрование воды по площади фильтра из-за образования на поверхности катионита корки загрязнений. Наличие в умягчаемой воде аммиака также снижает обменную емкость катионита по накипеобразователям.

Как отмечалось, расход реагента на регенерацию ионита оказывает существенное влияние на рабочую обменную емкость. Однако в эксплуатационных условиях необходимо стремиться к снижению удельного расхода реагента. Наилучшие результаты (1,2 – 1,5 г-экв/г-экв NaCl) могут быть достигнуты при использовании ступенчато-противоточных фильтров (см. рисунок 15). Такой же расход примерно обеспечивают и фильтры

непрерывного действия. Регенерация двумя порциями реагента разной концентрации (вначале более разбавленной), а также с использованием отмывочных вод позволяет достигнуть расхода 2 – 2,6, а без их использования 3,0 – 3,5 г-экв/г-экв. Важно также качество поваренной соли. Чем больше в ней кальция и магния, тем хуже будет отрегенирован катионит.

2.2 Схемы катионитных водоподготовительных установок

2.2.1 Натрий-катионитные установки

Обработка воды требует применения многих технологических процессов. Характер этих процессов и их последовательность могут изменяться в зависимости от качества исходной воды, требований к качеству обработанной воды, наличия и доступности специального оборудования и реагентов и других причин. Ввиду этого возникает необходимость в рассмотрении схем водоподготовительных установок, представляющих собой определенные сочетания технологических процессов. Наименование этих схем обычно составляется из входящих в них технологических процессов с сохранением их последовательности.

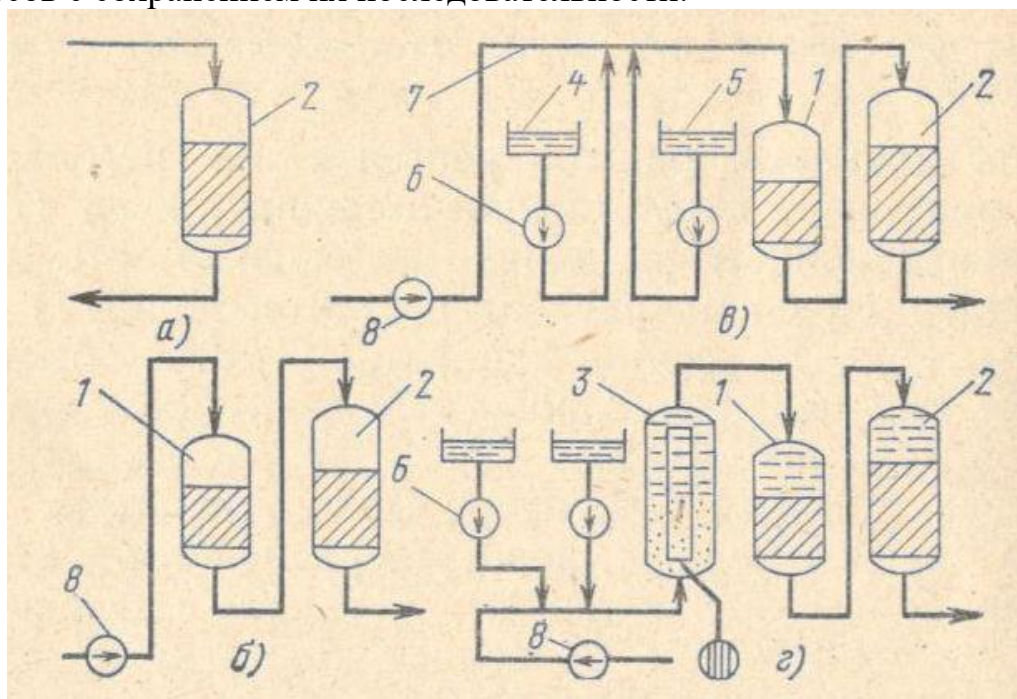


Рисунок 17 – Схемы натрий-катионитных установок

1 – механический фильтр; 2 – натрий-катионитный фильтр; 3 – напорный осветлитель; 4 – раствор коагулянта; 5 – раствор щелочи; 6 – насосы-дозаторы; 7 – обрабатываемая вода; 8 – насос.

Наиболее распространенными в промышленных энергоустановках являются нагрый-катионитные водоочистки, схемы которых приведены на рисунке 17. Наиболее простой и дешевой является установка непосредственного натрий-катионирования (рисунок 11,а). Она состоит из катионитных фильтров и реагентного хозяйства. Обрабатываемая на ней вода не должна содержать грубодисперсных и коллоидных загрязнений, а также гидроокиси железа. Этим условиям удовлетворяют многие артезианские воды, а также вода из сети питьевого водоснабжения.

Схема на рисунке 17,б с предвключенными механическими фильтрами допускает обработку вод, содержащих 80 – 100 мг/кг взвешенных веществ, а также артезианских вод, загрязненных железом ($\geq 0,5$ мг/кг). Ее целесообразно применять для обработки поверхностных вод, которые периодически загрязняются грубодисперсными веществами, хорошо удаляемыми в осветлительных фильтрах.

Схема на рисунке 17,в (коагуляция – фильтрование – натрий-катионирование) более универсальна, т.к. позволяет удалять взвешенные и коллоидные вещества. Обрабатываемая вода проходит осветлительные и каонитные фильтры. Перед осветлительными фильтрами трубопровод насосами-дозаторами подается раствор коагулянта из расходного бачка и, если необходимо, раствор щелочи. Выпадающая взвесь задерживается осветлительными фильтрами.

В схеме на рисунке 17,г перед осветлительными фильтрами включен напорный осветлитель, работающий со слоем взвешенного осадка. Преимущество этой схемы состоит в том, что она позволяет обрабатывать воду с высокой концентрацией взвешенных веществ (>300 мг/кг) и значительно снижает грязевую нагрузку на осветлительные фильтры. При использовании коагулянта и флокулянтов (например, ПАА) после осветлителя можно получить воду прозрачностью ≥ 30 см по шрифту. Следует отметить, что содержание коллоидных загрязнений в воде многих поверхностных источников водоснабжения большую часть года (8 – 10 месяцев) составляет незначительную величину. Поэтому коагуляционные установки в этих случаях работают 2 – 4 месяца в году. Имеются, однако, воды, требующие круглогодичной коагуляции.

Рассмотренные выше схемы называют еще прямоточными, т.к. в них нет разрыва потока воды, подаваемой одной группой насосов через всю цепочку. Основной их недостаток состоит в том, что они не способны уменьшать щелочность исходной воды.

2.2.2 Известково-натрий-катионитные установки

Известково-натрий-катионитные установки (рисунок 18) позволяют снизить жесткость, щелочность и сухой остаток исходной воды. Обрабатываемая вода насосом 1 подается в осветлитель 2, в который насосом 3 дозируется известковое молоко из расходной гидравлической мешалки 4.

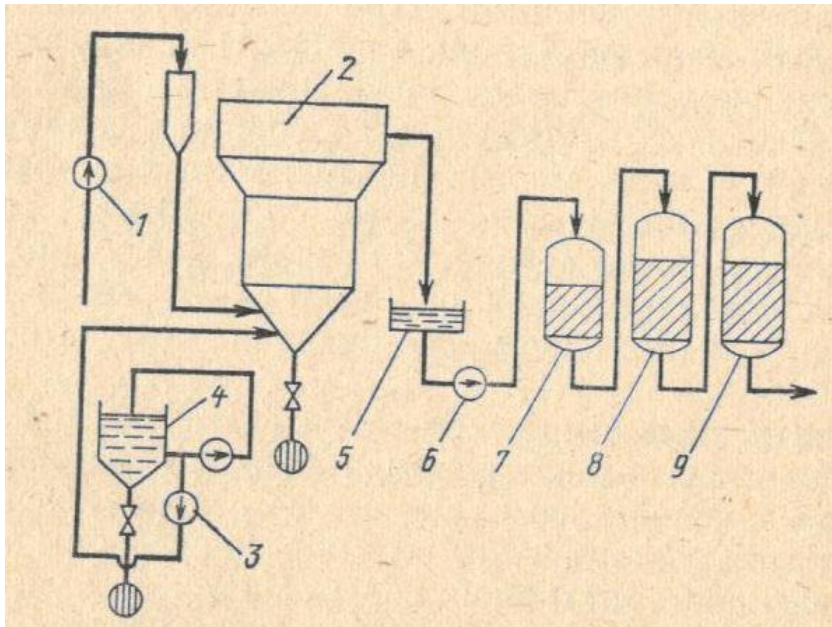


Рисунок 18 – Схема известково-натрий-катионитной установки

1,3,6 – насос; 2 – осветлитель; 4 – гидравлическая мешалка; 5 – промежуточный бак; 7 – осветлительный фильтр; 8 – Na-катионитный фильтр 1 ступени; 9 – Na-катионитный фильтр 2 ступени.

Известкованная вода поступает в промежуточный бак 5 и второй группой насосов 6 направляется на осветлительные 7 и далее на Na-катионитные фильтры первой 8 и второй 9 ступеней. Эти установки достаточно универсальны, т. е. допускают обработку воды, содержащей механические и коллоидные загрязнения. Недостатком их является громоздкость осветлителей и сравнительно сложное известковое хозяйство.

2.2.3 Водород-натрий-катионитные установки

Применяются схемы (рисунок 19) параллельного, последовательного и совместного водород-натрий-катионирования. Все они могут снижать щелочность исходной воды, хотя и в неодинаковой степени. В схеме на рисунке 19,а обрабатываемая вода, пройдя осветлительные фильтры 1, направляется двумя параллельными потоками на водородные 2 и натриевые 3 катионитные фильтры.

Пройдя фильтры, кислая вода смешивается со щелочной натрий-катионированной с целью нейтрализации свободных кислот, которая состоит в связывании ионов водорода бикарбонатным ионом.

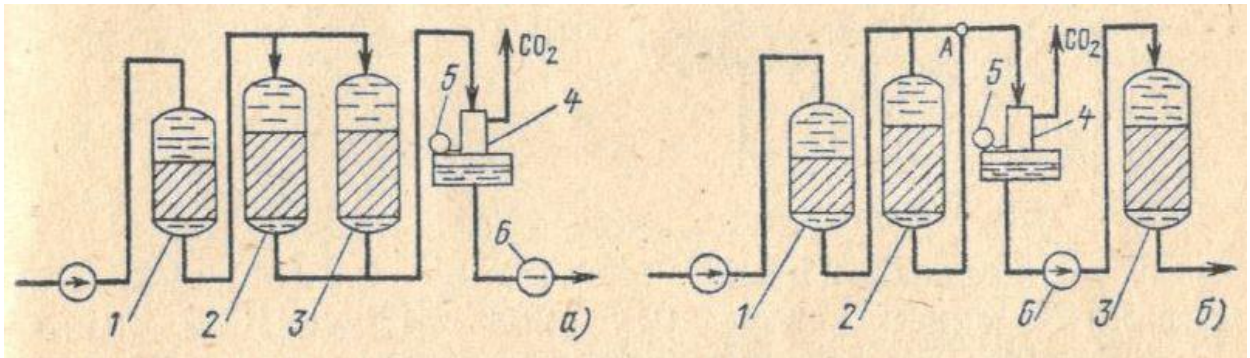


Рисунок 19 – Схема натрий-катионитных установок

а – параллельное Н – Na-катионирование; б – последовательное Н – Na-катионирование.

Для удаления образующейся углекислоты вода после фильтров направляется в дегазатор (десорбер, декарбонизатор) 4. Он содержит внутри специальную насадку, состоящую из керамических колец. Навстречу движению воды, стекающей по насадке в виде пленок или капель, вентилятором 5 подается воздух, который и удаляет из нее углекислоту; воздух подается в количестве 20 – 40 м³ на 1 м³ обрабатываемой воды. Остаточная концентрация СО₂ в воде после декарбонизатора зависит от температуры ее и при указанном расходе воздуха находится в пределах 2 – 6 мг/л.

Схема параллельного водород-натрий-катионирования обычно применяется для слабо минерализованных вод. Она позволяет получать умягченную воду с минимальной щелочностью 0,5 – 0,6 мг-экв/л. Для сильно минерализованных вод более целесообразна схема последовательного водород-натрий-катионирования (рисунок 19,б). После осветлительных фильтров 1 осветленная вода поступает на водород-катионитные фильтры 2. Кислая вода нейтрализуется щелочностью исходной воды, смешиваясь с ней, после чего смесь поступает в десорбер 4. Дегазированная вода второй группой насосов 6 направляется в натрий-катионитные фильтры 3 для окончательного умягчения.

Совместное водород-натрий-катионирование состоит в том, что катионит регенерируют вначале определенным количеством кислоты, а затем, после отмывания, определенным количеством соли. В результате катионит оказывается заряженным ионами Н⁺ и Na⁺. При фильтровании умягчаемой воды в слое катионита будут протекать процессы водород-натрий-катионирования. Жесткость водород-катионированной воды составляет 10 – 15 мкг-экв/кг и меньше.

2.2.4 Водород-катионитные установки с «голодной регенерацией»

Появление в первый период работы водород-катионитного фильтра кислой воды вносит осложнение в эксплуатацию: нужна защита трубопроводов от коррозии, нейтрализация кислых стоков и др. Эти недостатки устраняются при регенерации фильтра недостаточным количеством кислоты. Этот способ, известный под названием «голодной регенерации», получил широкое распространение. Особенность его состоит в следующем. В обычном водород-катионитном фильтре при регенерации весь слой катионита переводится в водород-катионит (рисунок 20,а).

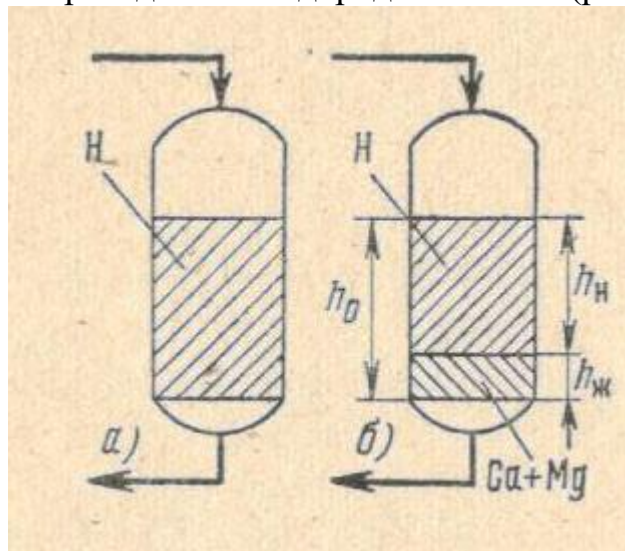


Рисунок 20 – Примерное расположение катионов в катионите

Это достигается за счет избытка кислоты, затраченной на регенерацию. Если кислоты взять с недостатком, то в нижней части катионита останется неотрегенированный слой кальций- и магний- катионита $h_{ж}$ (рисунок 20,б). Схема эта отличается от действительного распределения катионов отсутствием четких границ зон, но она удобна для вывода некоторых зависимостей.

В водородном слое h_H происходит поглощение всех катионов $K_T = Ж_0 + C_{Na} = K_0 + Щ_0 = C_{Cl^-} + C_{SO_4^{2-}} + Щ_0$, мг-экв/кг. Взамен их появляются ионы водорода, но уже в меньшем количестве, чем K_T , так как часть H^+ нейтрализует ионы HCO_3^- :



Количество таких ионов $\Delta Щ = Щ_0 - Щ_{ост}$, мг-экв/кг, где $Щ_0$, $Щ_{ост}$ – щелочность исходной и обработанной воды.

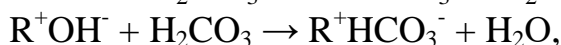
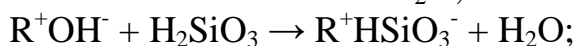
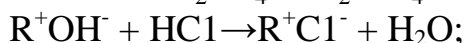
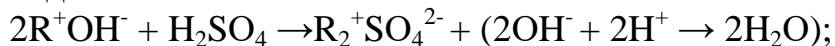
2.3 Обессоливание воды по методу ионного обмена

2.3.1 Анионирование

Обессоливание воды по методу ионного обмена связано с использованием процесса анионирования наряду с рассмотренным выше катионированием.

Анионированием называется процесс обмена анионов между растворенными в воде электролитами и твердым зернистым веществом, погруженным в эту воду и называемым анионитом. В качестве обменного чаще всего используется анион OH^- , хотя могут использоваться и другие анионы, например Cl^- , CO_3^- , HCO_3^- .

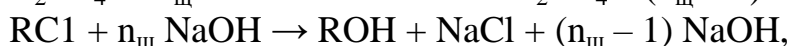
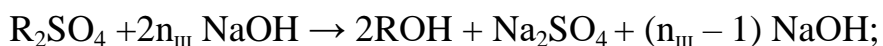
Анионирование может осуществляться при разных значениях pH обрабатываемой воды. Однако наиболее эффективно оно происходит в кислой среде, когда в воде присутствуют только ионы водорода. Поэтому для достижения глубокого удаления анионов обрабатываемую воду обычно вначале фильтруют через H-катионит, а затем через анионит. При фильтровании через анионит кислой водород-катионированной воды происходит замена анионов кислот обменным анионом



в результате чего происходит почти полное удаление из воды анионов сильных и слабых кислот и образование слабо диссоциирующих соединений H_2O и CO_2 . Благодаря последнему обстоятельству реакции необратимы, т. е. идут в одну сторону – слева направо. Это важное свойство процесса анионирования. Этим качеством процесс катионирования не обладает.

После замены всех обменных анионов OH^- или HCO_3^- анионит теряет способность к поглощению анионов из обрабатываемой воды. Регенерация его производится фильтрованием через слой анионита раствора реагента.

Происходящие при этом реакции условно можно выразить следующими уравнениями:



где $n_{\text{щ}}$ – удельный расход NaOH, г-экв на 1 г-экв поглощенных анионов.

Теоретически $n_{\text{щ}} = 1$ (40 г/г-экв), но на практике $n_{\text{щ}} = 1,5 \div 2,5$ для АН-31 и 4 – 5 для АВ-17-8 при поглощении всех анионов. Таким образом, значительное количество щелочи не используется. Для уменьшения этих потерь применяются разные способы и схемы регенерации. Однако полностью устранить их пока не удается.

2.3.2 Аниониты

Аниониты представляют собой искусственно приготовленные материалы. Они делятся на две группы: *слабоосновные* и *сильноосновные*. Слабоосновные аниониты способны к поглощению анионов только сильных кислот (SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^-); анионы слабых кислот (HSiO_3^- , HCO_3^- и др.) ими практически не задерживаются. Сильноосновные аниониты могут извлекать из водных растворов анионы сильных и слабых кислот. Однако они обычно обладают более высокой стоимостью и меньшей общей обменной емкостью в сравнении со слабоосновными. Поэтому эти аниониты применяют главным образом для поглощения кремниевой кислоты в установках глубокого обессоливания. Извлечение анионов сильных кислот производится при помощи слабоосновных анионитов. Таким образом, при полном обессоливании воды применяют обе группы анионитов. Сильноосновные аниониты используют при этом во второй ступени для поглощения кремниевой кислоты.

Аниониты подобно катионитам характеризуются неодинаковой способностью к поглощению различных анионов. Для большинства анионитов справедливым является соотношение $\text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$, показывающее, что каждый предыдущий анион поглощается более активно и в большем количестве, чем последующий. Так, для многих анионитов отношение рабочей обменной емкости по сульфатному иону к емкости по иону хлора лежит в пределах 1,4 – 1,5.

В отличие от катионитов обменная емкость анионитов возрастает с увеличением концентрации улавливаемого аниона. Это объясняется тем, что при анионировании не возникает противоионов в заметных количествах, так как продукты реакции ионного обмена слабо диссоциированы (H_2O , H_2CO_3).

Важной характеристикой сильноосновных анионитов является их кремнеемкость. Под *рабочей кремнеемкостью* понимается количество SiO_3^{2-} , г-экв, которое поглощает 1 м³ анионита. Она зависит от pH воды, начальной концентрации SiO_3 в обрабатываемой воде, удельного расхода щелочи на регенерацию, скорости фильтрования и других факторов. Для глубокого обескремнивания важно наиболее полное удаление из воды всех катионов, так как наличие их порождает противоионы, подавляющие диссоциацию анионита. С увеличением основности анионита степень влияния pH воды на остаточную концентрацию в воде SiO_3^{2-} уменьшается.

Техническая характеристика отечественных анионитов приведена в таблице 2. Анионит АВ-17-8 по своим свойствам близок к следующим зарубежным анионитам: амберлит IRA-400 и Дауэкс I (США), Зеролит FF (Англия), Дуолит А-101 (Франция), Вофатит SBW (ГДР), Леватит М-500 (ФРГ) и др.

Таблица 2 – Показатели качества анионитов

Марка анионита	Размер зерен, мм	Насыпная масса анионита, т/м ³		Объемная емкость, г-экв/м ³			Коэффициент набухания катионита $K_{НАБ}$	
		товарного	набухшего в воде	по SO_4^{2-}	по Cl^-	по SiO_3^{2-}	сухого	товарного
ЭДЭ-10П	0,4 – 1,6	0,6 – 0,64	0,96	1200	800	-	2,9	15
АН-31	0,4 – 2,0	0,72 – 0,75	0,8	850	-	-	2,1	15
АВ-17-8	0,3 – 1,2	0,72	0,74	-	-	400	2,2	50 – 60

Сильноосновные аниониты наряду с анионами минеральных поглощают анионы и органических кислот, которые обладают большими размерами. Проникая в узкие поры зерен анионитов, органические вещества не могут выйти обратно и поэтому не могут быть полностью удалены из них при регенерации. В результате происходит прогрессирующее их накопление в анионите, ведущее к снижению обменной емкости последнего. Этому недостатка лишены так называемые макропористые аниониты, обладающие однородными крупными порами, из которых анионы органических веществ могут успешно удаляться. В настоящее время такие аниониты синтезированы и производятся промышленностью. Они способны задерживать из воды 70 – 90% органических веществ, которые в последующем в значительной мере удаляются при регенерации.

Следует отметить, что полное удаление органических веществ из воды представляет собой трудную и сложную задачу. Применение процессов коагуляции, хлорирования, сорбции не обеспечивает требуемых результатов и органические вещества «пробивают» цепочку предвключенных фильтров и поступают на сильноосновные иониты.

2.3.3 Обессоливание воды

Под *обессоливанием воды* понимают удаление из нее катионов и анионов растворенных в ней веществ. На обессоливание обычно подается предварительно обработанная вода. Она проходит «цепочку» фильтров (см. п. 2.5): вначале водород-катионитные, в которых удаляются катионы, затем анионитные, поглощающие анионы. По мере удаления из воды ионов ее удельное электрическое сопротивление ρ , Ом·см, возрастает, а удельная электропроводность χ , Ом⁻¹·см⁻¹, уменьшается.

Глубокое обессоливание воды характеризуется значением $\rho=(5\div 10) 10^{-6}$ Ом·см или $\chi=(0,1\div 0,2) 10^{-6}$ Ом⁻¹·см⁻¹ и меньше. Единица измерения удельной электропроводности, равна $1 \cdot 10^{-6}$ Ом⁻¹·см⁻¹, называется микросименсом на сантиметр. Следовательно, $\chi = 0,1\div 0,2$ мкСм/см. При частичном обессоливании $\chi > 1$ мкСм/см. Современные блочные обессоливающие

установки (см.п. 2.6) позволяют надежно получать конденсат с $\chi=0,1\div 0,15$ мкСм/см.

Обессоливание воды может быть осуществлено разными способами: химическим (ионообменным), термическим, электродиализом, гиперфильтрацией (обратный осмос), магнитным и др. Первый способ требует затраты больших количеств реагентов, значительная часть которых уходит со сточными водами в реки и другие водоемы. Это входит в противоречие с требованием охраны природы и устранения загрязнения природных вод. Вот почему остальные способы, позволяющие вести обессоливание воды с минимальным расходом реагентов, привлекают в настоящее время внимание ученых, инженеров и производителей. Эти способы интенсивно разрабатываются и совершенствуются, и уже достигнуты существенные успехи в этой области.

2.3.4 Схемы обессоливающих установок

При ионообменном способе обессоливания обрабатываемая вода проходит ряд ступеней, каждая из которых предназначена для выполнения определенной функции. Набор ступеней, выстроенных в технологически необходимой последовательности, называется *схемой обессоливающей установки*.

Если исходная вода поступает из поверхностных источников, то она прежде всего направляется на установку предварительной очистки, состоящей из осветлителей и механических фильтров. Здесь удаляются грубодисперсные и коллоидные загрязнения и органические вещества.

Осветленная и лишенная этих загрязнений вода поступает дальше в ряд фильтров: вначале на катионитные (водородные) первой (H_1), второй (H_2), а иногда и третьей (H_3) ступеней для удаления всех катионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , NH_4^+ и др.), затем на анионитные первой (A_1), второй (A_2) и третьей (A_3) ступеней для удаления всех анионов сильных (SiO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , NO_2^-) и слабых ($HSiO_3^-$, HCO_3^-) кислот. Часто фильтры H_3 и A_3 заменяются одним фильтром смешанного действия. Фильтры H_1 большей частью загружаются сульфоглем СК-1, H_2 – катионитом КУ-2, A_1 – слабоосновным анионитом АВ-31, A_2 и A_3 – анионитом АВ-17. Для маломинерализованных вод H_2 также загружаются СК-1.

Количество ступеней обработки может быть разным, что зависит от степени обессоливания воды. На рисунке 21 изображены две схемы: частичного и глубокого обессоливания. Первая находит применение на электростанциях, оборудованных барабанными котельными агрегатами высокого и сверхвысокого давлений. Вторая является основной для современных блочных электростанций с прямоточными «отельными агрегатами СКД.

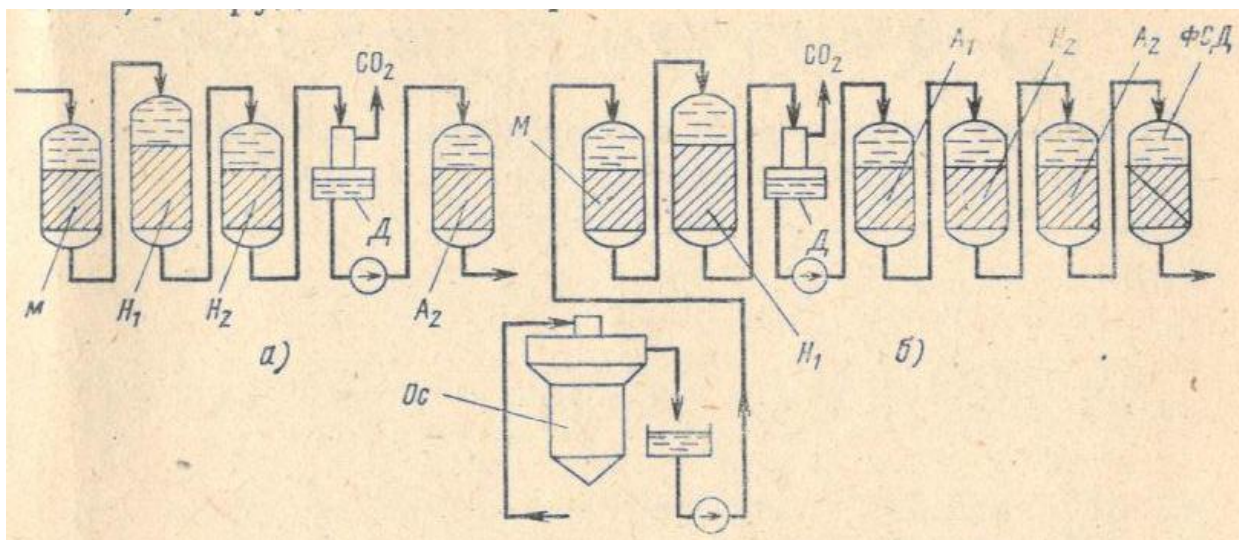


Рисунок 21 – Схемы обессоливающих установок

а – частичное обессоливание; б – полное обессоливание.

Используя указанные выше буквенные обозначения фильтров разных ступеней, схемы, приведенные на рисунке 21, можно изобразить и следующим образом: схема на рисунке 21,а: М – Н₁ – Н₂ – Д – А₂; схема на рисунке 21,б: Ос – М – Н₁ – Д – А₁ – Н₂ – А₂ – ФСД, где Д – декарбонизатор, в котором удаляется СО₂; Ос – осветлитель.

Рассмотренные две схемы – не единственные. Например, среди схем частичного обессоливания могут быть и такие: Н'₁ – Н''₁ – Д – А₁; Н'₁ – Н''₁ – Н₂ – Д – А₁.

Декарбонизаторы могут устанавливаться после фильтров Н₁ или А₁. По-разному располагая в этой «цепочке» фильтры и декарбонизатор, можно получить разные схемы обессоливающих установок, используемые при разном качестве исходных природных вод и других условиях. Однако все они будут аналогичны приведенным на рисунке 21.

В технологической линии обессоливания воды наибольшую ионную нагрузку несут фильтры Н₁ и А₁ т. е. фильтры первой ступени. С целью снижения пророска катионов, а также экономии реагентов водород-катионитные фильтры первой ступени часто устанавливаются «сдвоенными», т. е. ставятся два фильтра один за другим (Н'₁ – Н''₁), так это показано на рисунке 22.

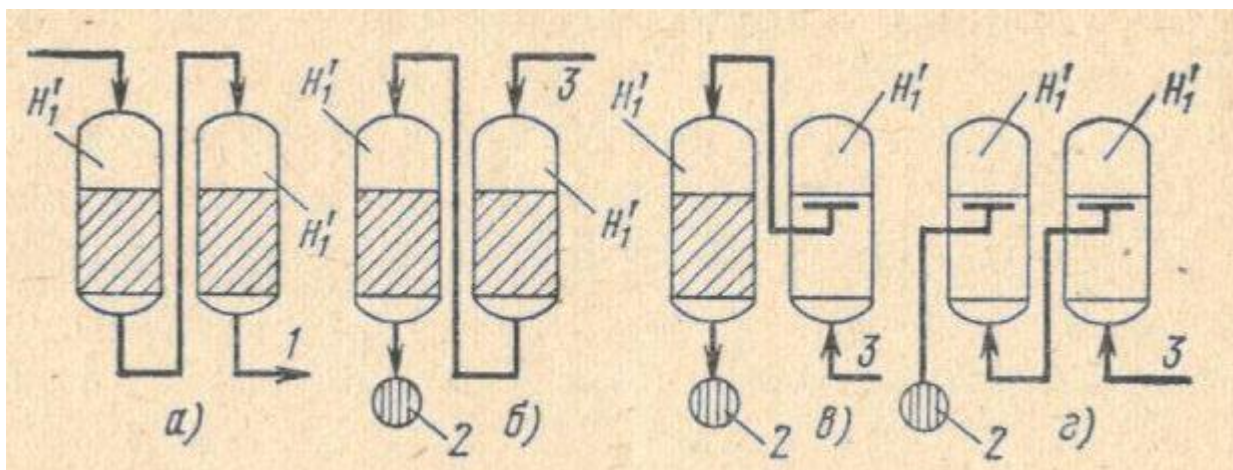


Рисунок 22 – Схема работы и регенерации сдвоенных фильтров

1 – в сеть; 2 – дренаж; 3 – раствор реагента.

На рисунке 22,а приведена схема работы этой пары фильтров и возможные схемы регенерации: прямоточная (рисунок 22,б), противоточная (рисунок 22,в) и смешанная (рисунок 22,г). Эти фильтры часто называются ступенчато-противоточными, что строго говоря, может относиться только к схеме на рисунке 22,в. Такие же пары фильтров ставятся и в качестве анионитных фильтров первой ступени ($A'_1 - A''_1$).

Регенерация сдвоенных фильтров даже по схеме на рисунке 22,б дает заметную экономию реагентов и увеличивает степень регенерации фильтра H''_1 . Схемы на рисунке 22,б и г существенно повышают технико-экономические показатели работы этих фильтров. Для сохранения глубины регенерации фильтра H''_1 (или A''_1) отмывку его следует вести фильтратом H'_1 , A'_1 или частично обессоленной водой. Обычно парные фильтры ставят при высокой концентрации ионов ($\geq 4 - 5$ мг-экв/л).

Фильтры первой ступени ставятся в таком количестве и такого диаметра, чтобы расчетное количество регенераций было не более трех и не менее одной в сутки. Следует также стремиться к тому, чтобы количество работающих фильтров данного типа было не более четырех.

Необходимо отметить, что противоточная регенерация по схемам на рисунке 22,в и г недостаточно эффективна из-за ненадежного зажатия слоя ионита. В результате распределение регенерационного раствора по объему ионита происходит неравномерно, что снижает эффективность регенерации. Поэтому взамен сдвоенных обычных фильтров более целесообразно применять специальные ступенчато-противоточные фильтры, описанные выше (см. рисунок 16), позволяющие снизить удельный расход реагентов, до 1,3 – 1,5 г-экв/г-экв.

2.3.5 Оборудование обессоливающих установок

2.3.5.1 Фильтры

На обессоливающих установках используются обычные ионитные фильтры, описанные выше. Выпускаемые промышленностью ионитные фильтры первой ступени имеют большую высоту и рассчитаны на слой ионита 2 – 2,5 м. Они работают обычно при скоростях фильтрования не более 20 м/ч, что зависит от качества обрабатываемой воды. Фильтры второй и третьей ступеней, воспринимающие значительно меньшую ионную нагрузку, имеют меньшую высоту и рассчитаны на слой ионита 1,5 м. Скорость фильтрования на H_2 допускается 40 – 50, на A_2 – 20 – 30, A_1 (АН-31) – ≤ 20 м/ч.

Специальную конструкцию и назначение имеют фильтры смешанного действия, используемые только на обессоливающих установках. В эти фильтры загружается смесь катионита КУ-2 и анионита АВ-17. Эффект действия этой смеси сводится к следующему.

Для глубокого удаления прибегают к цепочке фильтров $H_1 - A_1 - H_2 - A_2 - H_3 - A_3$, в которой на последующий фильтр данного типа поступает вода с значительно меньшей концентрацией удаляемых ионов. Для получения минимальной концентрации ионов в обессоленной воде следовало бы применять длинные цепочки фильтров, например $H_1 - A_1 - H_2 - A_2 - \dots - H_{n-1} - A_{n-1} - H_n - A_n$. В фильтре смешанного действия (ФСД) осуществлены такие цепочки. В загруженной в него хорошо перемешанной смеси зерна КУ-2 соседствуют с зернами АВ-17 и образуют длинные цепочки $H - A$, которые и способствуют глубокому обессоливанью обрабатываемой воды.

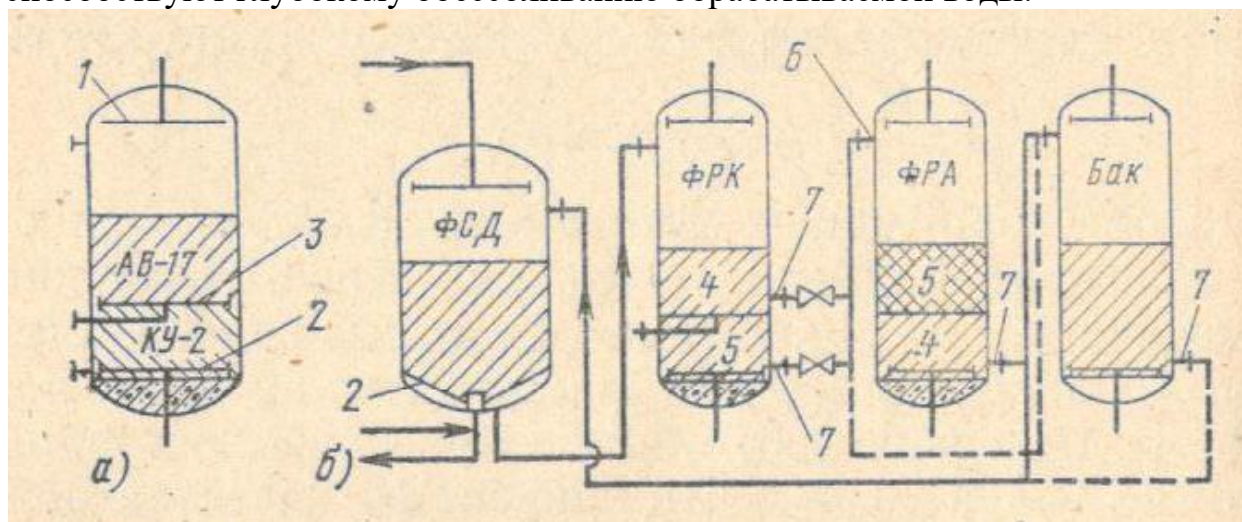


Рисунок 23 – Схема ФСД с внутренней и выносной регенерацией

1 – верхнее дренажно-распределительное устройство; 2 – нижнее дренажно-распределительное устройство; 3 – среднее дренажно-распределительное устройство; 4 – слой анионита; 5 – слой катионита; 6 – штуцер для загрузки материала; 7 – штуцер для выгрузки материала.

На рисунке 23,а приведена схема ФСД с внутренней регенерацией, на рисунке 23,б – с выносной регенерацией; фильтры-регенераторы катионита ФРК, анионита ФРА и бак ФСД с внутренней регенерацией используются преимущественно на обычных обессоливающих установках, с выносной – на установках, обессоливающих турбинный конденсат.

Фильтр смешанного действия имеет три дренажно-распределительных устройства: верхнее 1, нижнее 2 и среднее 3, играющее в технологическом процессе работы фильтра важную роль. Оно располагается на такой высоте от нижнего распределительного устройства, чтобы по его оси проходила линия раздела слоев КУ-2 и АВ-17. В соответствии со значением плотности зерен ионитов катионит располагается внизу, а анионит – над ним. После смешения этих ионитов между собой граница раздела исчезает и в фильтре образуется в общем однородный фильтрующий слой, через который обрабатываемая вода проходит сверху вниз со скоростью 40 – 50 м/ч.

Большие скорости могут вызвать поломку среднего дренажа и потому, нежелательны. Чтобы снять это ограничение, предложена и широко применяется выносная регенерация. Она состоит в том, что истощенные иониты из ФСД выгружаются в фильтр-регенератор катионита (ФРК) и разделяются в нем на слой анионита 4 и катионита 5. Далее можно поступить двояко: отрегенерировать оба ионита в ФРК и затем перегрузить в регенератор анионита ФРА или анионит перезагрузить в ФРА, оставив катионит в ФРК, и оба ионита регенерировать отдельно. При этом сводится к минимуму возможность регенерации КУ-2 щелочью или АВ-17 кислотой. После отдельной регенерации катионит перегружается в ФРА. Можно устанавливать третий сосуд, являющийся баком. В таком случае после отдельной регенерации иониты перегружаются в этот бак, смешиваются и оставляются в резерве (см. штриховую линию). После выхода из работы очередного ФСД истощенные иониты выгружаются в ФРК, а в ФСД из бака подается отрегенерированная смесь ионитов. После контрольного перемешивания ионитов ФСД включается в работу, а выгруженные иониты проходят тем временем регенерацию по описанной схеме.

Выгрузка и загрузка ионитов производятся гидравлическим способом. Для этого фильтры и регенераторы имеют специальные штуцера для загрузки материала 6 и выгрузки 7. Эти штуцера соединены специальной сетью трубопроводов, как это примерно показано на рисунке 23. Если необходимо выгрузить иониты из ФСД в ФРК, то в ФСД подается вода через распределительное устройство 2 и в нем создается давление около $(1,5 \div 2) \cdot 10^5$ Па. Затем открывается вентиль на линии, идущей к штуцеру 6 ФРК, и смесь воды и ионитов «переливается» в ФРК, из которого избыток воды удаляется через нижний дренаж. Имея необходимую сеть трубопроводов, можно перегрузить иониты из любого ФСД в ФРК или другой сосуд. Проектными нормативами на установках, обессоливающих турбинный конденсат, предусматривается сооружение трех регенераторов на

четырёх энергоблоков СКД мощностью ≤ 500 МВт. Регенераторы обычно имеют меньший диаметр, чем ФСД, чтобы создать в них слой ионита большей высоты, чем в ФСД. Последние, лишённые среднего дренажа, допускают увеличение скорости фильтрования до 100 м/ч и выше.

2.3.6 Блочные обессоливающие установки

В воде, циркулирующей в замкнутом контуре (см. п.1.1.1) энергетического блока, концентрация загрязнений постепенно нарастает. Одна часть их образуется в самом контуре, вторая – поступает извне. В контуре образуются преимущественно продукты коррозии конструкционных материалов (Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , CuO , ZnO и др.), которые присутствуют в виде мелкодисперсной фазы, т.е. мелких частиц ($\geq 0,5 - 1$ мкм). Извне поступают главным образом вещества, растворённые и частично в коллоидной форме. Они попадают в контур с охлажденной водой через неплотности в конденсаторе турбины, с обессоленной водой, восполняющей потери пара и конденсата, и с растворами реагентов (NH_3 , N_2H_4), если они готовятся на недостаточно очищенной воде.

Для поддержания концентрации дисперсных и ионных загрязнений в питательной воде прямоточных котельных агрегатов СКД на заданном уровне необходимо осуществить вывод их из контура энергоблока. Эту задачу и решает установка, обессоливающая турбинный конденсат и называемая блочной обессоливающей установкой (БОУ). В схеме энергоблока (см. рисунок 1) она располагается за конденсатором турбины.

В соответствии с характером удаляемых ею загрязнений она состоит обычно из двух групп фильтров: предвключённых механических, удаляющих дисперсные загрязнения, и смешанного действия. Необходимость и обязательность включения ФСД в БОУ общепризнанны. Что касается механических фильтров, то здесь возможны варианты. Для удаления взвешенных веществ, главным образом продуктов коррозии, возможно использование разных фильтров: намывных ионитных и целлюлозных, зернистых сульфугольных и электромагнитных.

Намывные целлюлозные фильтры обладают высокой единичной производительностью (≥ 500 м³/ч) и удовлетворительным качеством работы.

Однако им свойственны и недостатки: сложность операции восстановления работоспособности (смыв и намыв целлюлозы), а также очистки сточных вод от сбрасываемой в дренаж целлюлозы; необходимость устанавливать после них ловушки целлюлозы. Сульфугольные фильтры (СУФ) отличаются большой простотой в обслуживании и надёжностью в работе. Они представляют собой обычные механические фильтры, загруженные слоем сульфугля высотой 0,8 – 1,0 м.

Электромагнитные фильтры (ЭМФ) также могут быть использованы в качестве механических фильтров на БОУ. Правда, они могут успешно задерживать только частицы Fe_3O_4 (магнетит), другие дисперсные

загрязнения могут проходить на ФСД. Однако продукты коррозии (Fe_3PO_4) являются основным загрязнением турбинного конденсата. Поэтому ЭМФ на БОУ взамен сульфугольных является оправданным.

Сульфугольные фильтры имеют одну особенность, которой не обладают намывные фильтры и ЭМФ. Будучи отрегенированы кислотой, они могут удалять из воды аммиак (ион NH_4^+), который вводится на ГРЭС в питательную воду для поддержания требуемого рН. Это существенно удлиняет время работы ФСД между регенерациями, поскольку обменная емкость ФСД по КУ-2 истощается аммонием. Несмотря на это, на некоторых ГРЭС сульфугольные фильтры не регенируются, а только периодически взрыхляются конденсатом для удаления задержанных загрязнений и снижения гидравлического сопротивления. На отдельных ГРЭС взрыхление осуществляется только при ремонтах энергоблоков. Вместо промывок фильтр 2 – 3 раза в год дренируют, вскрывают и снимают верхний слой катионита толщиной примерно 20 – 30 мм, в котором и сосредоточено основное количество задержанных загрязнений, создающих сопротивление проходу воды.

Практикой отмечено, что нормальное обезжелезивание конденсата на отрегенируемом сульфугольном фильтре БОУ начинается спустя некоторое время после включения его в работу (1 – 3 дня). Оно, по-видимому, необходимо, необходимо для формирования в слое сульфугля пленки продуктов коррозии, которая и обуславливает эффект обезжелезивания. Поэтому на ГРЭС, проводящих редкие промывки сульфугольных фильтров или удаляющих загрязнения вручную, отмечается более высокая степень обезжелезивания конденсата (около 50 – 60 %), чем там, где фильтры проходят систематические регенерации (40 – 50%). Оптимальный режим эксплуатации сульфугольных фильтров следует поэтому устанавливать на каждой ГРЭС, учитывая местные условия и эксплуатационную обстановку.

Оценивая все упоминавшиеся выше механические фильтры по степени обезжелезивания конденсата, следует отметить, что все они могут обеспечить степень обезжелезивания в пределах примерно 40 – 50 % при обычных концентрациях железа перед БОУ (8 – 12 мкг/кг). С увеличением исходной концентрации Fe степень обезжелезивания возрастает.

В последние годы появилась тенденция, направленная на отказ от установки на БОУ предвключенных механических фильтров. В США около 80 – 90% вновь проектируемых БОУ их не имеют. На БОУ некоторых отечественных ГРЭС они также отсутствуют. Можно было бы ожидать в этом случае ухудшения работы ФСД: занос зерен ионитов продуктами коррозии, ускоренный рост гидравлического сопротивления, снижение количества обработанного конденсата за фильтроцикл. Однако, как показывает опыт, эксплуатация БОУ без механических фильтров проходит нормально. Эта тенденция, ведущая к упрощению и удешевлению БОУ,

представляется обоснованной и, вероятно, следует ожидать развития этого направления в будущем.

Нужно, однако, иметь в виду, что отключение уже работающих или отказ от установки новых сульфугольных фильтров должны сочетаться с проведением мер, обеспечивающих поддержание в водоконденсатном тракте энергоблока минимальной концентрации железа ($\leq 8 - 10$ мкг/кг) и CO_2 при установившемся режиме. Высокие концентрации Fe и CO_2 и медленный выход энергоблока на нормальный редким при растопках могут привести к ухудшению работы БОУ без механических фильтров. Попадание в больших количествах CO_2 в водоконденсатный тракт энергоблока вызывает увеличение дозы NH_3 , вводимого в питательную воду для поддержания заданного рН. Это ведет к быстрому истощению обменной емкости ФСД.

2.3.7 Эксплуатация обессоливающих ионообменных установок

Эксплуатация фильтров обессоливающих установок по существу не отличается от эксплуатации катионитных фильтров, рассмотренных выше. Работа катионитных и анионитных фильтров обессоливающих установок также состоит из двух периодов: работы, когда фильтр обрабатывает воду, и периода восстановления его обменной емкости. Количество выдаваемой фильтром воды определяется скоростью фильтрования (см. п. 2.3.4). Обычно этот параметр выбирается на стадии проекта. Но он зависит от ряда других величин и не может произвольно задаваться. Чем меньше скорость фильтрования, тем меньше остаточная концентрация удаляемого иона в фильтрате и выше обменная емкость, что весьма важно для фильтров A_2 и A_3 . Это указывает на важность отыскания оптимального режима работы фильтров в данных эксплуатационных условиях.

При истощении обменной емкости фильтров первой ступени H_1 начинается проскок натрия и, следовательно, понижение кислотности фильтрата. При снижении ее на $0,5 - 1,0$ мг-экв/кг фильтры H_1 отключаются на регенерацию. Истощение фильтров A_1 определяется по проскоку аниона Cl^- что обуславливает появление кислого фильтрата. При увеличении концентрации Cl^- до $3 - 5$ мг/кг и появлении в фильтрате слабой кислотности фильтр A_1 выводится из работы.

Требования к воде после фильтров H_2 и A_2 могут быть разными в зависимости от схемы обессоливающей установки и характера потребителей обессоленной воды. Поэтому показатели качества фильтрата этих фильтров должны быть определены при наладке установки или заданы проектом. Фильтры H_3 и A_3 является замыкающими технологическую линию обработки и выводятся на регенерацию по достижении предельных значений показателей качества фильтра, устанавливаемых ПТЭ или другими нормативами.

Технология процесса регенерации фильтров в основном, не отличается от изложенной выше (см. п. 2.1.3). Она состоит из трех главных операций:

взрыхление слоя ионита, пропуск через него рабочего' раствора реагента с заданной скоростью и отмывка ионита от продуктов регенерации. Взрыхление проводится потоком воды снизу вверх. Хотя скорости воды при взрыхлении обычно известны и задаются, эту операцию требуется провести без выноса эффективных фракций ионита ($\geq 0,3$ мм), который может наблюдаться и при нормативной скорости воды. Это обычно происходит при появлении местных высокоскоростных потоков воды, возникающих в местах рыхлой упаковки ионита.

Регенерация (пропуск раствора реагента) и отмывка ионита от продуктов регенерации часто проводятся с одной и той же скоростью. Водород-катионитные фильтры регенерируются и отмываются со скоростью 10 м/ч. Анионитные фильтры регенерируются и отмываются на первом этапе (примерно 40 – 50 мин) со скоростью 4 – 5 м/ч, которая повышается на втором этапе до 10 – 12 м/ч. При подаче в регенерируемый фильтр регенерационного раствора необходимо установить в нем давление примерно на $0,5 \cdot 10^5$ Па меньше, чем в работающем фильтре, чтобы исключить попадание раствора в последние. Предотвратить попадание можно также установкой перед каждым фильтром на реагентной линии двух запорных органов с дренажной трубкой между ними. Такое устройство позволяет точно оценить герметичность арматуры.

Получение обессоленной воды связано с большим расходом реагентов и воды на собственные нужды. Поэтому необходимо повторно использовать отмывные воды (особенно фильтров второй и третьей ступеней, ФСД) для взрыхления, приготовления рабочих растворов реагентов, отмывки фильтров от продуктов регенерации. Отмывку следует производить водой, в которой в значительной мере или полностью отсутствовали бы ионы, задерживаемые отмываемым фильтром. Необходимо стремиться к тому, чтобы при отмывке не истощить последние слои ионита, с которым обрабатываемая вода контактирует на выходе из фильтра. Это особенно важно для фильтров второй и третьей ступеней.

Аниониты, особенно сильноосновные, в значительной мере задерживают и присутствующие в обрабатываемой воде органические вещества. Они сорбируются как ионы либо путем физической абсорбции на поверхности и в порах зерен анионита. Проникающие в эти поры крупные молекулы органических веществ не могут быть вытеснены обратно за короткое время, обычно занимаемое регенерацией, что ведет к «отравлению» анионита и потере им значительной доли обменной емкости.

Это повлекло разработку и применение ряда мер. Поскольку органические вещества не могут быть удалены полностью на предочистке, в составе оборудования обессоливающей установки появились сорбционные фильтры, загруженные активированным углем и расположенные перед анионитными фильтрами. В последующем были синтезированы аниониты, обладающие относительно крупными порами (макропористые) и

равномерной пористостью (изопористые). Макропористые аниониты могут поглощать органические вещества обратимо. Тем не менее, наиболее полному удалению органических веществ из воды до анионитных фильтров, т.е. на предочистке, должно уделяться достаточное внимание.

2.4 Обработка пара и конденсата

2.4.1 Обезжелезивание конденсата

Окислы железа Fe_2O_3 , Fe_3O_4 находятся в конденсате в виде частичек различной степени дисперсности (0,1 – 1,5 мкм и более). Ввиду этого они могут быть отфильтрованы, т.е. удалены фильтрованием конденсата в осветлительных (механических) фильтрах, загруженных различными материалами: сульфоуглем, дробленным антрацитом, целлюлозой. Количество окислов в турбинном конденсате энергоблоков СКД в период установившегося режима их работы не превышает 10 – 15, чаще находится в пределах 6 – 10 мкг/кг (в пересчете на Fe). В конденсате электростанций высокого и сверхвысокого давлений, оснащенных котельными агрегатами с естественной циркуляцией, концентрация железа достигает 30 – 100 мкг/кг. При неустановившемся режиме работы энергоблоков СКД концентрация Fe в конденсате может увеличиться до 200 – 300 мкг/кг и выше.

В качестве осветлительных используются зернистые слоевые фильтры, загружаемые сульфоуглем, а также намывные целлюлозные или ионитные. Скорость фильтрования на сульфоугольных фильтрах достигает 40 – 50, а на намывных 10 м/ч. Однако последние имеют значительно большую поверхность фильтрования. Поэтому производительность намывных фильтров составляет 500, сульфоугольных и того же диаметра (2 м) 120 м³/ч.

Обезжелезивающие сульфоугольные фильтры нашли широкое применение на современных электростанциях, оснащенных мощными энергоблоками. Здесь при нормальном режиме работы энергоблока межпромывочный период сульфоугольных фильтров достигает 3 – 4 месяца, после чего фильтры промываются или регенерируются кислотой. На некоторых ГРЭС эти фильтры не регенерируются совсем, а промывка их производится 2 – 3 раза в год. Как показывает опыт этих ГРЭС, редко промываемые и нерегенерируемые обезжелезивающие сульфоугольные фильтры лучше задерживают окислы железа, чем систематически промываемые или регенерируемые кислотой. Это объясняется тем, что на поверхности длительно работающего без промывки слоя сульфоугля образуется магнетитовая пленка, которая улучшает задерживающие качества фильтра.

Намывные целлюлозные фильтры имеют межпромывочный период 1 – 2 месяца, в зависимости от концентрации железа в исходном конденсате. Степень обезжелезивания и на сульфоугольных и на целлюлозных фильтрах составляет 45 – 55 %. Намывные целлюлозные фильтры работают несколько

лучше, однако эксплуатация их сложнее. Работа их связана со сбросом отработавшей целлюлозы или ионитных порошков, что вносит затруднение в очистку сточных вод. Оба типа фильтров обеспечивают соблюдение норм ПТЭ по концентрации железа в конденсате (≤ 10 мкг/кг).

2.4.2 Обезжелезивание производственных конденсатов

Производственными называются конденсаты, образующиеся в оборудовании технологических цехов промышленных предприятий, теплообменниках различного назначения, калориферах, паровых рубашках реакторов, конденсаторах и т. п. Производственные конденсаты часто возвращаются на электростанции, которые отпускают предприятиям пар, или в котельные агрегаты промышленных котельных. И поэтому важно, чтобы конденсат содержал минимум окислов железа, допустимый с точки зрения требований, предъявляемых паровыми котельными агрегатами. Однако, как показывает опыт, производственные конденсаты большей частью сильно загрязнены железом, концентрация которого порой достигает 1000 – 1500 мкг/кг и выше. Основной причиной этого является коррозия пароконденсатного тракта. Наличие в паре свободной углекислоты, проникновение в конденсатный тракт кислорода (т. е. воздуха при открытых схемах сбора конденсата) в сочетании с высокой ($353 - 373$ °К) температурой создают благоприятные условия для интенсивной коррозии оборудования и трубопроводов.

В стремлении избавиться от железа предприятия, возвращающие производственные конденсаты, стараются, прежде всего, соорудить обезжелезивающие установки. Между тем правильнее вначале устранить условия, благоприятствующие коррозии. Для этого следует свести к минимуму наличие в конденсате свободной CO_2 путем: рациональной вентиляции паровых объемов теплообменников или применения одной из декарбонизационных схем водоочистки. Остаток CO_2 целесообразно нейтрализовать аммиаком, если последний не противопоказан в данных условиях, и повысить рН конденсата до 8,5 – 9,0. Затем следует осуществить закрытую схему сбора конденсата, находящуюся под небольшим давлением, чтобы исключить попадание воздуха в систему.

Как показывает опыт, этих мероприятий часто оказывается достаточно, чтобы концентрация железа в конденсате снизилась и не превышала 100 мкг/кг. После проведения упомянутых мер можно рассмотреть вопрос сооружения обезжелезивающей установки. Большей частью она состоит из обычных нерегенерируемых сульфугольных фильтров. Регенерации окажутся необходимыми, если фильтры будут одновременно и умягчать конденсат. Применение намывных целлюлозных, перлитных или ионитных фильтров для обезжелезивания производственных конденсатов не может быть рекомендовано из-за возникающих эксплуатационных усложнений (частые регенерации, проблема удаления отработанных материалов).

2.4.3 Обезжелезивание конденсата электромагнитными фильтрами (ЭМФ)

В последнее время начали применять электромагнитные фильтры, используемые для удаления из воды и конденсата окислов железа, обладающих ферромагнитными свойствами. К таким окислам относятся магнетит Fe_3SO_4 (черный), гематит $\gamma - \text{Fe}_2\text{O}_3$ (бурый), а также соединения (ферриты) $\text{CuO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{ZnO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ и др., обладающие ферромагнитными свойствами.

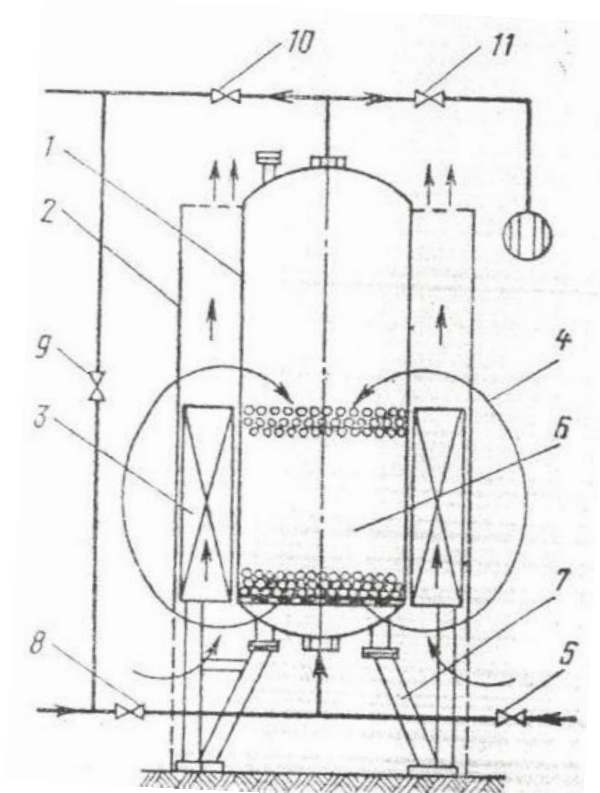


Рисунок 24 – Схема электромагнитного фильтра

Электромагнитный фильтр (рисунок 24) состоит из фильтра (корпуса) 1, расположенной вокруг него электромагнитной катушки (соленоида) 3 и слоя загруженных в фильтр шаров 6, изготовленных из ферромагнитной стали. Все это располагается на опорах 7. При пропускании по виткам катушки постоянного электрического тока вокруг витков появляется магнитное поле. Его силовые линии 4 пронизывают слой шариков, создавая в межшариковых объемах высокие напряженности магнитного поля, необходимые для задержания мелких частичек магнитных окислов железа.

Вне фильтра магнитные силовые линии выходят далеко за пределы катушки, огибая ее и замыкаясь в слое шариков. Это означает, что вокруг фильтра на расстоянии 1,5 – 2,0 м может обнаруживаться магнитное поле, которое следует учитывать. Если катушку закрыть внешними магнитопроводами, то рассеивание магнитного потока устраняется.

Рассеивание значительно снижает долю полезно используемой магнитодвижущей силы.

Потребляемая катушкой электроэнергия превращается в тепло, которое следует отводить, т. е. необходимо надежно охлаждать катушку. Для увеличения тяги при естественном охлаждении вокруг фильтра установлен кожух 2. Стрелками показана циркуляция охлаждающего воздуха. Обрабатываемый конденсат подается в фильтр через задвижку 8, проходит снизу вверх слой шариков со скоростью 1000 м/ч и выходит через задвижку 10 в сеть. После истощения железомкости шариков, равной примерно 1,5 – 2 г/кг шаров, фильтр ставится на промывку. Для этого открывается задвижка на байпасе 9, закрываются задвижки 10 и 8, с катушки снимается электронапряжение, шарики размагничиваются. Затем открываются задвижки 5 и 11 и примерно в течение 1 мин фильтр промывается. Все эти операции производятся автоматически по заданной программе. После промывки фильтр вновь включается в сеть.

Степень обезжелезивания на электромагнитных фильтрах в условиях ГРЭС СКД не превышает 45 – 55 %, а остаточная концентрация железа в фильтрате при начальной концентрации 8 – 10 составляет 4 – 5 мкг/кг и меньше. Так как эти фильтры термостойки, то они могут устанавливаться практически в любой точке тепловой схемы энергоблока.

Одним из основных параметров электромагнитного фильтра является напряженность магнитного поля.

Удаление мелких частиц магнетита требует значительной напряженности магнитного поля, т. е. мощных электромагнитных катушек.

2.4.4 Обезмасливание конденсата

Производственный конденсат, возвращаемый на электростанцию, часто содержит масла (нефтепродукты). Паропотребители, загрязняющие конденсат маслом, могут быть разделены на две группы: загрязняющие непрерывно и периодически. К первой группе относятся паровые поршневые машины разного назначения, ко второй – многие паропотребители коксохимических, нефтеперерабатывающих заводов, использующих пар для нагрева нефтепродуктов в теплообменниках поверхностного типа. Паропотребители первой группы отличаются тем, что первоначально маслом загрязняется пар, при конденсации которого и получается замасленный конденсат. Количество масла в паре здесь сравнительно невелико (примерно 150 – 200 мг/л) и для данного типа машин примерно постоянно. Поступление масла в пар обуславливает образование в конденсате устойчивых эмульсий масла.

Загрязнение маслом конденсата, получаемого от потребителей второй группы, носит другой характер. Здесь масло попадает только в конденсат и притом только в случае неисправности теплообменных аппаратов, когда через образовавшуюся неплотность масло поступает в межтрубное

пространство, в котором находится конденсат. В нормальном режиме при исправной аппаратуре конденсат не содержит масла или присутствие его определяется весьма малой концентрацией.

Для первой группы потребителей обезмасливание конденсата целесообразно начать с паровой фазы, т. е. обезмасливания пара. Оно производится в аппаратах, зазываемых *пароочистителями*. В основу их работы заложено сочетание следующих принципов: выбрасывание капелек масла из парового потока при резких его поворотах или круговой траектории движения и прилипание их к поверхности перегородок при ударе о них пара. Поэтому в пароочистителях пар движется по сложной траектории, многократно меняя направление и отражаясь от поверхностей, стоящих на его пути. Пароочистители снижают концентрацию масла в паре до 10 – 15 мг/л. Более глубокое обезмасливание пара достигается в паропромывателях, в которых он барботирует через слой воды. Остаточная концентрация масла в этом случае составляет 3 – 5 мг/л.

Очистка конденсата от масла производится на специальной обезмасливающей установке (рисунок 25).

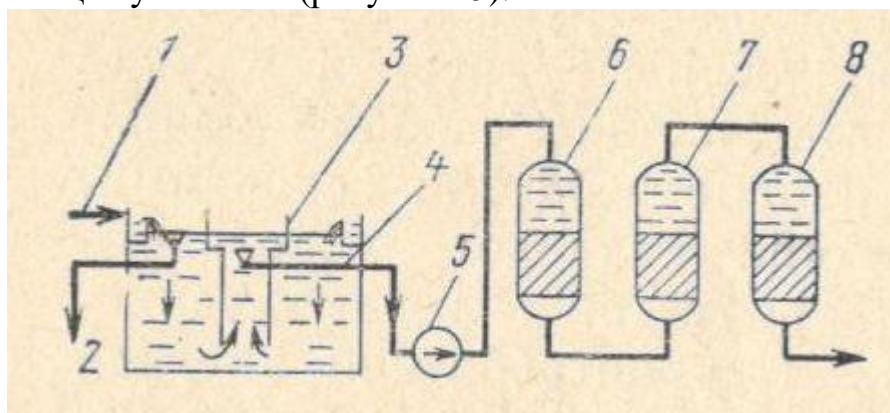


Рисунок 25 – Принципиальная схема обезмасливающей установки

1 – конденсат; 2 – сборник; 3 – центральная труба; 4 – бак-отстойник; 5 – осветлительный фильтр; 7 – сорбционный фильтр; 8 – катионитный фильтр.

Загрязненный маслом конденсат 1 поступает в сборный бак-отстойник 4, в котором происходит отделение капелек масла от воды путем движения воды в баке сверху вниз. Собирающееся на поверхности масло отводится из бака в сборник 2. Насосом 5, забирающим конденсат из верхней части центральной трубы 3, конденсат подается на осветлительные фильтры 6, загруженные дробленным коксом или антрацитом с размером зерен 1 – 2 мм. В них удаляется масло, содержащееся в конденсате в виде капель. Затем конденсат поступает на сорбционные фильтры 7, загруженные активированным углем. В них происходит уже глубокая очистка конденсата от масла, концентрация которого снижается до 0,5 – 1 мг/кг.

При прохождении осветлительных и сорбционных фильтров жесткость конденсата часто заметно возрастает, увеличивается его кремне- и солесодержание. Поэтому после сорбционных фильтров нередко устанавливают катионитные фильтры 8. Если же конденсат должен использоваться в котельных агрегатах высокого давления, то его следует направлять на водоподготовительную установку для обескремнивания и обессоливания. Причина возрастания жесткости конденсата и загрязнения его другими примесями после осветлительных и сорбционных фильтров заключается в растворении зольных примесей, содержащихся в коксе и активированном угле. Скорость фильтрования конденсата составляет примерно 5 – 7 м/ч. Для очистки конденсата от масла могут также использоваться намывные фильтры, работающие на смеси порошков перлита и активированного угля.

2.5 Магнитная обработка воды

2.5.1 Магнитная обработка воды, конструкции аппаратов

Обработка воды в магнитном поле применяется для борьбы с накипеобразованием. Сущность метода состоит в том, что при пересечении с водой магнитных силовых линий накипеобразователи выделяются не на поверхности нагрева, а в массе воды. Образующиеся рыхлые осадки (шлам) удаляют при продувке. Метод эффективен при обработке вод кальциево-карбонатного класса, которые составляют около 80 % вод всех водоемов нашей страны и охватывают примерно 85 % ее территории.

Обработка воды магнитным полем широко используется для борьбы с накипеобразованием в конденсаторах паровых турбин, парогенераторах низкого давления и малой производительности в тепловых сетях и сетях горячего водоснабжения и различных теплообменных аппаратах, где использование других методов обработки воды экономически нецелесообразно. В сравнении с умягчением воды основными преимуществами магнитной обработки являются простота, дешевизна, безопасность и почти полное отсутствие эксплуатационных расходов.

Магнитная обработка природных вод (как пресных, так и минерализованных) уменьшает интенсивность образования накипи на поверхностях нагрева только при условии перенасыщенности их как карбонатом, так и сульфатом кальция в момент воздействия магнитного поля и при условии, что концентрация свободного оксида углерода меньше его равновесной концентрации.

Противонакипный эффект зависит от состава воды, напряженности магнитного поля, скорости движения воды и продолжительности ее пребывания в магнитном поле и от других факторов. На практике применяют

магнитные аппараты с постоянными стальными или ферритобариевыми магнитами и электромагнитами. Аппараты с постоянными магнитами конструктивно проще и не требуют питания от электросети. В аппаратах с электромагнитом на сердечник (кern) наматываются катушки проволоки, создающие магнитное поле.

Магнитный аппарат монтируется к трубопроводам в вертикальном или горизонтальном положении с помощью переходных муфт. Скорость движения воды в зазоре не должна превышать 1 м/с. Процесс работы аппаратов может сопровождаться загрязнением проходного зазора механическими, главным образом ферромагнитными примесями. Поэтому аппараты с постоянными магнитами необходимо периодически разбирать и чистить. Оксиды железа из аппаратов с электромагнитами удаляют, отключив их от сети.

Результаты исследований показали, что для воды с карбонатной жесткостью 6 – 7 мг-экв/л, окисляемостью 5,6 мг O₂/л и содержанием 385 – 420 мг/л оптимальная напряженность магнитного поля составляла (10 – 12,8) 19⁴ А/м, что соответствует силе тока 7 – 8 А.

Помимо предотвращения накипеобразования магнитная обработка может применяться для интенсификации процесса коагуляции и кристаллизации, ускорения растворения реагентов, повышения эффективности использования ионообменных смол, улучшения бактерицидного действия дезинфектантов.

2.6 Удаление из воды коррозионно-активных газов

2.6.1 Виды и места проявления коррозии в котлах

2.6.1.1 Кислородная коррозия

Наиболее часто от кислородной коррозии страдают стальные водяные экономайзеры котельных агрегатов, которые при неудовлетворительной деаэрации питательной воды выходят из строя через 2 – 3 года после их установки.

Непосредственным результатом кислородной коррозии стальных экономайзеров является образование в трубках свищей, через которые с большой скоростью вытекает струя воды. Подобные струи, направленные на стенку соседней трубы, способны изнашивать (истирать) ее вплоть до образования сквозных отверстий. Поскольку трубы экономайзеров располагаются достаточно компактно, то образовавшийся коррозионный свищ способен вызвать массовое повреждение труб, если котельный агрегат длительно остается в работе с появившимся свищом. Чугунные экономайзеры кислородной коррозией не повреждаются.

Кислородной коррозии чаще всего подвергаются входные участки экономайзеров. Однако при значительной концентрации кислорода в питательной воде он проникает и в котельный агрегат. Здесь кислородной коррозии подвергаются главным образом барабаны и опускные трубы. Подъемные (парогенерирующие) трубы страдают от кислородной коррозии в значительно меньшей мере. Это объясняется деаэрирующим действием образующихся в этих трубах паровых пузырьков. Основной формой кислородной коррозии является образование в металле углублений (язв), приводящих при их развитии к образованию свищей.

Увеличение давления интенсифицирует кислородную коррозию. Поэтому для котельных агрегатов с давлением 10 МПа и выше опасными являются даже «проскоки» кислорода в деаэраторах. Существенное значение имеет состав воды, с которой соприкасается металл. Наличие небольшого количества щелочи усиливает локализацию коррозии, присутствие хлоридов рассредоточивает ее по поверхности.

2.6.1.2 Стояночная коррозия

Котельные агрегаты, находящиеся в простое, поражаются электрохимической коррозией, которая получила название стояночной. По условиям эксплуатации котельные агрегаты нередко выводят из работы и ставят в резерв или останавливают на длительное время. При останове котельного агрегата в резерв давление в нем начинает падать и в барабане возникает вакуум, вызывающий проникновение воздуха и обогащение котловой воды кислородом. В результате создаются условия для появления кислородной коррозии. Даже в том случае, когда вода полностью удаляется из котельного агрегата, внутренняя поверхность его не бывает сухой. Колебания температуры и влажности воздуха вызывают явление конденсации влаги из атмосферы, заключенной внутри котельного агрегата. Наличие же на поверхности металла пленки влаги, обогащенной при доступе воздуха кислородом, создает благоприятные условия для развития электрохимической коррозии. Если на внутренней поверхности котельного агрегата имеются отложения, способные растворяться в пленке влаги, интенсивность коррозии значительно возрастает. Подобные явления могут наблюдаться, например, в пароперегревателях, которые часто страдают от стояночной коррозии. Поэтому при выводе котельного агрегата из работы в длительный простой необходимо удалить имеющиеся отложения промывкой.

Стояночная коррозия может нанести серьезные повреждения котельным агрегатам, если не будут приняты специальные меры их защиты. Опасность ее заключается еще и в том, что созданные ею в период простоя коррозионные очаги продолжают действовать и в процессе работы.

Для предохранения котельных агрегатов от стояночной коррозии производят их консервацию, т. е. ставят в специальные условия, исключающие коррозию.

Существует много способов консервации, среди которых можно отметить следующие:

1. *Удаление котловой воды и осушение внутренних поверхностей («сухой способ»).*

Остановленный котельный агрегат охлаждается, надежно отключается от всех магистралей и трубопроводов заглушками. Из него удаляются вода и отложения и поверхности просушиваются. В процессе сушки открываются все воздушники. По окончании сушки в барабаны ставятся противни или кладутся пакеты с влагопоглотителями (CaCl_2 , CaO , силикагелем) из расчета примерно 1,5 – 2 кг на 1 м³ объема котельного агрегата. Все люки и запорные органы плотно закрываются. При длительном останове котельного агрегата периодически (1 раз в 2 – 3 месяца) проверяется состояние влагопоглотителя и при необходимости производится замена свежим.

2. *Заполнение котельного агрегата питательной водой и поддержание в нем избыточного давления.* Остановленный котельный агрегат (барабанный) расхолаживается, продувается через нижние точки для удаления шлама, отключается от всех водо- и паропроводов, полностью заполняется деаэрированной водой и ставится под давление деаэраторов. При выводе котельного агрегата в резерв после ремонта он заполняется деаэрированной водой до нормального уровня, растапливается и при давлении 0,2 МПа в течение 2 – 3 ч продувается через воздушники для полного удаления из воды кислорода. После этого котельный агрегат ставится на консервацию под избыточным давлением.

3. *Нанесение на внутренние поверхности котельного агрегата пленки концентрированного раствора нитрита натрия.* Способ применим для простых небольших котельных агрегатов низкого и среднего давления. Применяется раствор нитрита натрия (NaNO_2) концентрацией примерно 10 %. Нанесение пленки можно сделать двумя путями: котельный агрегат заполняется раствором NaNO_2 , который выдерживается в нем 20 – 30 мин, а затем спускается в бак для повторного использования; по второму способу внутренние поверхности смачиваются раствором NaNO_2 . После высыхания на поверхности металла остается тонкая пленка концентрированного раствора, пассивирующая металл. Перед пуском котельного агрегата эту пленку необходимо смыть и раствор удалить в дренаж.

4. *Заполнение котельного агрегата раствором гидразина.* После вывода из работы при небольшом давлении котельный агрегат продувают через все нижние точки для удаления шлама. Затем при давлении 0,3 – 0,4 МПа его заполняют деаэрированной водой до нормального уровня и вводят насосом-дозатором 3 – 5 %-ный раствор гидразина с едким натром до создания в котловой воде концентрации N_2H_4 200 – 250 мг/кг. Воду в парогенераторе кипятят 1 – 2 ч для перемешивания реагента с водой. После этого котельный агрегат может быть заполнен полностью деаэрированной водой и подключен к деаэратору. Создание избыточного давления в этом

способе необязательно. При снижении концентрации гидразина до 100 мг/кг вводят новую его порцию. При консервации после ремонта котельный агрегат заполняют водой до нормального уровня, кипятят 1 – 2 ч воду для удаления O_2 , вводят гидразин и далее – по указанной выше схеме.

5. *Подсоединение котельного агрегата к источнику насыщенно пара с давлением 0,2 – 0,3 МПа.* В этом случае избыточное давление создается насыщенным паром, отбираемым, например, из расширителя продувки, линии отбора соответствующего давления или другого подходящего источника. Вначале остановленный котельный агрегат продувают через нижние точки для удаления лама, затем снижают давление до 0,2 – 0,3 МПа и подключают источнику пара.

6. *Обработка внутренних поверхностей котельного агрегата комплексонами.* Отключенный от всех магистралей и охлажденный котельный агрегат освобождают от воды и заполняют раствором трилона Б с концентрацией 300 – 800 мг/кг. Раствор готовят в баках на необескислороженной воде (но не содержащей NH_3 и N_2H_4), поскольку присутствие кислорода положительно действует на эффект обработки. Раствор подают до тех пор, пока не будет заполнен котельный агрегат и перегреватель, после чего начинают медленную растопку, пар сбрасывают через продувочную линию перегревателя, а избыток воды – через дренаж водяного экономайзера. Давление в течение 4 – 6 ч (I этап) поддерживают на уровне, соответствующем температуре насыщения 423 ОК. Затем оно постепенно (3 – 5 ч) повышается до рабочего с выдержкой на этом давлении 1 – 2 ч (II этап). В процессе обработки следует стремиться к минимально необходимой подпитке водой. После окончания обработки котельный агрегат можно включить в работу без замены воды.

В этом методе на внутренней углеродистой стали образуется защитная пленка, обладающая высокой противокоррозионной стойкостью, что позволяет обработанный по этому способу котельный агрегат выводить в ремонт и оставлять открытым, не опасаясь коррозии внутренних поверхностей. Противокоррозионную стойкость обработанная трилоном Б поверхность сохраняет в течение 1,5 – 2 года. Перед обработкой имеющиеся накипные отложения должны быть удалены. Изложенный способ не может быть применен для котельных агрегатов с давлением менее 0,4 МПа.

7. *Консервация азотом.* В этом способе оборудование (котельный агрегат, турбина, теплообменные аппараты) полностью заполняется азотом, содержащим не более 0,5 % O_2 , и создается некоторое давление, поддерживаемое в течение всего периода простоя оборудования. Способы консервации прямоточных котельных агрегатов СКД зависят от причин и длительности его останова. Но во всех этих способах используются либо газовый метод (заполнение азотом), либо растворы гидразина, аммиака или трилона Б.

2.6.1.3 Межкристаллитная коррозия

Межкристаллитная коррозия возникает в заклепочных швах и вальцовочных соединениях паровых котельных агрегатов, которые омываются котловой водой. Она характеризуется появлением в металле трещин, вначале весьма тонких, незаметных для глаза, которые, развиваясь, превращаются в большие видимые трещины. Они проходят между зёрнами (кристаллитами) металла, почему эта коррозия и называется межкристаллитной. Разрушение металла при этом происходит без деформации. Обычно сопровождающей его. Поэтому разрушения, вызванные межкристаллитной коррозией, называются «хрупкими», бездеформационными. Хрупких разрушений заклепочных швов или вальцовочных соединений, находящихся в контакте с паром, не наблюдается.

Установлено, что межкристаллитная коррозия возникает лишь при одновременном наличии следующих трех условий: а) *высоких растягивающих напряжений в металле, близких к пределу текучести;* б) *неплотностей в заклепочных швах или вальцовочных соединениях;* в) *агрессивных свойств котловой воды.* Отсутствие одного из них исключает появление хрупких разрушений, что и используется на практике для борьбы с межкристаллитной коррозией.

Среди перечисленных условий наиболее важным следует считать первое – возникновение высоких растягивающих напряжений. Анализ причин поражения котельных агрегатов межкристаллитной коррозией показывает, что во многих случаях первопричиной служили термические деформации элементов котельного агрегата сопровождавшиеся высокими напряжениями в металле. Они возникают при неравномерном нагревании или охлаждении элементов котельного агрегата, быстром сбросе нагрузки, форсированном охлаждении при останове и других аналогичных условиях. Быстрое и неравномерное охлаждение или нагревание барабанов вызывает их коробление и нарушение плотности вальцовочных и заклепочных соединений. Это приводит к появлению в трубах кольцевых трещин обычно в местах действия вальцовки.

В процессе растопки или останова отдельные элементы котельного агрегата (экраны, нижний барабан и др.) деформируются или изменяют свое положение, т. е. перемещаются. Эти перемещения должны каждый раз контролироваться, чтобы иметь уверенность в том, что данный элемент не зажат. Защемление подвижного элемента вызывает опасные напряжения в металле.

К появлению межкристаллитных трещин приводит также местное охлаждение металла барабана на небольших участках. Оно возможно в местах соединения с телом барабана трубопроводов питательной воды, периодической продувки, ввода раствора фосфата и водоуказательных колонок. Во всех этих вальцовочных соединениях металл барабана охлаждается, если температура протекающей по трубе жидкости меньше

температуры насыщения. Местное охлаждение барабана всегда сопряжено с появлением в металле высоких напряжений. Поэтому ввод в барабан относительно холодных потоков производится посредством термозащитных рубашек (рисунок 26), изолирующих их от тела барабана.

Хрупкие разрушения являются наиболее опасными, приводящими нередко к тяжелым авариям. В то же время возникновение и развитие их в начальный период не поддаются контролю. Однако межкристаллитная коррозия сопровождается явлениями, которые могут служить признаками ее наличия. Такими признаками являются: образование солевых наростов у кромок шва или головок заклепок, отскакивание головок заклепок или дребезжащий звук при обстукивании их молотком во время остановки котельного агрегата на ремонт, пропаривание и течь заклепочных швов и вальцовочных соединений. При обнаружении этих явлений или одного из них барабаны необходимо тщательно проверить в отношении наличия межкристаллитных трещин.

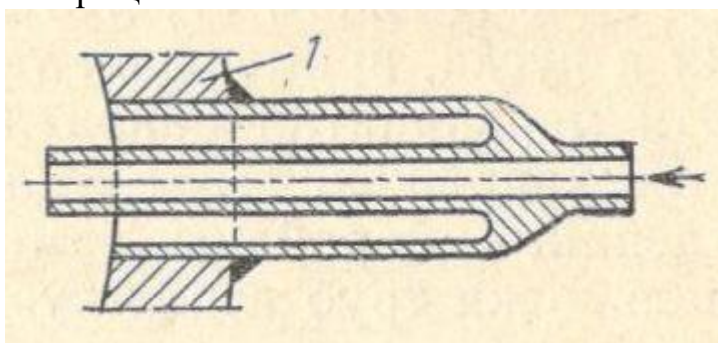


Рисунок 26 – Теплозащитная рубашка

1 – тело барабана.

Агрессивность котловой воды определяется составом растворимых в ней солей. Важное значение имеет содержание едкого натра, который при высоких концентрациях (5 – 10 %) реагирует с металлом. Такие концентрации и достигаются в неплотностях заклепочных швов и вальцовочных соединений, в которых происходит упаривание котловой воды. Вот почему наличие неплотностей может привести к появлению хрупких разрушений при соответствующих условиях. Кроме того, важным показателем агрессивности котловой воды является относительная щелочность.

Считается, что для предотвращения хрупких разрушений значение относительной щелочности не должно превышать 20 %. Относительная щелочность зависит от состава исходной воды и метода ее обработки, если в котельные агрегаты добавляется химически обработанная вода.

Методы борьбы с хрупкими разрушениями основаны на устранении одного из перечисленных выше условий их возникновения. Они заключаются, прежде всего, в устранении неравномерного нагрева или

охлаждения барабанов, наблюдении за расширением трубных контуров котельного агрегата, выполнении правил останова и пуска, применении термозащитных рубашек и т. п. Эти все мероприятия направлены на ликвидацию чрезмерных напряжений в металле и неплотностей. Нередко клепаные барабаны заменяются сварными, а взамен вальцовки труб используется сварка.

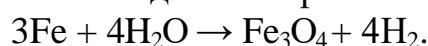
Борьба с агрессивностью котловой воды ведется двумя способами. По одному из них, известному под названием «нитратного режима», в котельные агрегаты вводится раствор натриевой селитры.

Соли азотной кислоты пассивируют металл, на чем и основан их защитный эффект. Нитратный режим, являющийся, как показывает опыт, весьма эффективным, применим, однако, только для котельных агрегатов с давлением пара не выше 7,0 МПа. При больших давлениях селитра разлагается, и режим теряет свое назначение.

Для котельных агрегатов высокого давления применяют второй способ, основанный на удалении из котловой воды агрессивного свободного натрия. Он получил название режима чисто фосфатной щелочности. Сущность его заключается в том, что в котловой воде создается щелочность, обусловленная только тринатрийфосфатом (см. п. 2.7.4.2).

2.6.1.4 Пароводяная коррозия

Пароводяной коррозией называется разрушение металла в результате химического взаимодействия его с водяным паром



Разрушение металла становится возможным для углеродистых сталей при увеличении температуры стенки труб до 673 °К и более, для легированных сталей выше 803 – 858 °К. Продуктами коррозии является газофазный водород и магнетит. Пароводяная коррозия имеет как равномерный, так и локальный характер. В первом случае на поверхности металла образуется слой продуктов коррозии, поверхность которых иногда имеет серебристый цвет. Местный характер коррозии имеет вид язв, бороздок и трещин.

Основной причиной возникновения паровой коррозии является нагрев стенки трубы до критической температуры, при которой интенсифицируется реакция окисления металла водой. Этому способствуют ряд условий, из которых следует отметить нарушение циркуляции в парогенерирующей трубе, высокие плотности тепловых потоков ($\geq 230 \cdot 10^3$ Вт/м²), появление пленочного режима кипения, ведущего к перегреву металла.

В соответствии с изложенным пароводяная коррозия наблюдается в пароперегревателях и парогенерирующих трубах (экранных) котельных агрегатов, температура которых по тем или иным причинам достигает критических значений.

Борьба с пароводяной коррозией осуществляется путем устранения причин, вызывающих перегрев металла руб. Следует отметить, что рассматриваемый вид коррозии нельзя устранить путем какого-то изменения или улучшения водно-химического режима котельного агрегата, так как причины пароводяной коррозии кроются в топочных и внутрикотловых гидродинамических процессах, а также условиях эксплуатации.

2.6.1.5 Подшламовая коррозия

Этот вид коррозии происходит под слоем шлама, образовавшегося на внутренней поверхности трубы котельного агрегата. Химический состав шлама может быть различен, что зависит от состава загрязнений, поступающих с питательной водой в котельный агрегат. Подшламовая коррозия может, таким образом, возникать тех случаях, когда в котельный агрегат подается недостаточно очищенная вода, которая несет в себе вещества, образующие твердую фазу, т. е. осадок (взвешенные вещества). Такие условия могут создаваться в котельных, оснащенных барабанными котельными агрегатами, чаще всего небольшой производительности и низкого деления ($\leq 4,0$ МПа), работающими на высококалорийном топливе (газ, мазут).

Повреждения металла, возникающие при подшламовой коррозии, имеют локальный (язвенный) характер и располагаются обычно на полупериметре трубы, обращенном в топку. Образующиеся язвы имеют вид раковин диаметром до 20 мм и более, заполненных окислами железа, создающими «бугорок» над язвой (Fe_3O_4 внизу и Fe_2O_3 сверху). Подобные повреждения образуются преимущественно под слоем железистых отложений, фосфатный шлам не вызывает подобных повреждений. Основным процессом, приводящим к подшламовой коррозии, является реакция $\text{Fe} + 4\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 3\text{Fe}_3\text{O}_4$ с участием твердого деполяризатора Fe_2O_3 . Следовательно, наличие в котельном агрегате железистых отложений, состоят в основном из Fe_2O_3 , опасно не только с точки зрения накипеобразования, но и коррозии, поскольку это соединение выступает в роли поставщика кислорода. Нередко подшламовая коррозия сочетается с пароводяной, так как под слоем шлама возможен нагрев металла до критической температуры.

Основным методом предупреждения подшламовой коррозии является устранение поступления в котельный агрегат значительных количеств окислов железа Fe_2O_3 и меди CuO , Cu_2O . Вот почему важно при составлении проекта водоподготовки котельной внимательно рассмотреть и цикл использования пара производственными потребителями с целью обеспечить возврат в котельную производственного конденсата с минимальной концентрацией железа (≤ 100 мкг/кг).

2.6.2 Деаэрация и декарбонизация воды. Устройство оборудования.

2.6.2.1 Термическая деаэрация (дегазация) воды

Деаэрацией (дегазацией) называется процесс, имеющий целью удаление из нее растворенных агрессивных газов – кислорода и углекислоты. Удаление из воды одного кислорода называется *обескислороживанием*. Деаэрация воды осуществляется термическим способом, обескислороживание – химическим.

Термическая дегазация воды основана на уменьшении растворимости в воде газов с понижением их парциальных давлений в пространстве над водой, для чего ее доводят до температуры кипения при данном давлении. Численное значение давления, под которым находится деаэрируемая вода, практически не влияет на эффект деаэрации. Ввиду этого она может быть осуществлена при давлении как выше, так и ниже атмосферного, т. е. в вакууме.

Деаэрация воды осуществляется в аппаратах, называемых *деаэраторами*. По давлению в аппарате деаэраторы разделяют на вакуумные (ДСВ – деаэраор стрйный или струйно-барбатажный) $P < 1,16 \cdot 10^5$ Па, атмосферные (ДСА) $P = (1,2 \div 1,7) \cdot 10^5$ Па и повышенного давления (ДСП) $P = (1,7 \div 7) \cdot 10^5$ Па. Атмосферные деаэраторы в свою очередь могут быть подразделены на деаэраторы смешивающего типа и деаэраторы перегретой воды. Кроме того, по способу распределения в них пара и воды различают деаэраторы пленочные, струйные, капельные и барботажные.

2.6.2.2 Деаэраторы смешивающего типа

Атмосферный деаэратор смешивающего типа изображен на рисунке 27. Он состоит из деаэрационной колонки 1 и бака-аккумулятора 2, служащего емкостью для деаэрированной воды. Эта емкость оборудована водоуказательными стеклами 3, манометром 4, гидравлическим затвором 5, устраняющим образование в колонке большого давления или вакуума, и термометром на выходе деаэрированной воды к питательным насосам.

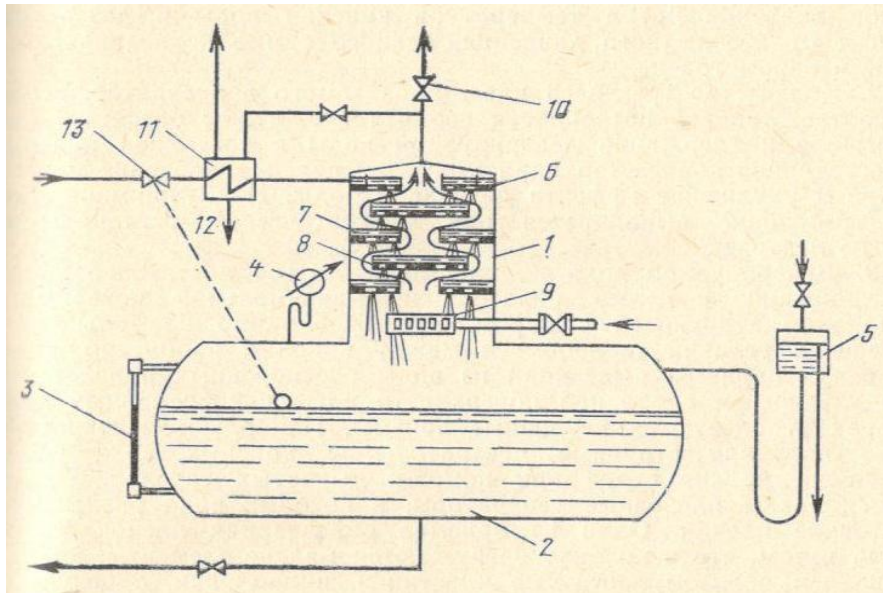


Рисунок 27 – Схема атмосферного деаэрата смешивающего действия

1 – деаэрационная колонка; 2 – бак-аккумулятор; 3 – водоуказательное стекло; 4 – манометр; 5 – гидравлический затвор; 6 – распределительное устройство; 7,8 – тарелки; 9 – распределитель пара; 10 – вентиль; 11 – охладитель выпара; 12 – дренажный бак; 13 – регулятор подачи пара и воды.

В верхней части колонки установлено распределительное устройство 6, под которым располагаются тарелки 7, 8. В плоском днище тарелок имеются отверстия диаметром 5 – 7 мм, сквозь которые вода вытекает в виде струек и падает с первой тарелки на вторую, со второй на третью и т. д. В правильно работающей колонке пространство между тарелками заполнено тонкими струями воды, образующими дождевую завесу. Греющий пар подается в нижнюю часть колонки через распределитель пара 9, пройдя который он постепенно поднимается вверх, пересекая струи воды, падающие с тарелок. Выделяющиеся из воды газы вместе с несконденсировавшимся паром удаляются из колонки через вентиль 10 в атмосферу или поступают в охладитель выпара 11, в котором пар конденсируется, отдавая тепло поступающей в деаэратор воде, и далее направляются в дренажный бак 12. Вода, нагретая до кипения и освобожденная от газов, падает в бак-аккумулятор, откуда она забирается питательными насосами. Бак-аккумулятор является существенным элементом деаэрата. В нем выделяются пузырьки газа, оставшиеся после колонки, а также происходит десорбция. Деаэратор обычно снабжается автоматическими регуляторами подачи пара и воды 13.

Вследствие ряда причин в аккумулятор могут попадать отдельные струи воды, не полностью дегазированные. Поэтому для удаления проскочившего в аккумулятор кислорода, углекислоты и повышения степени разложения бикарбоната натрия в современных деаэратах применяют

продувание (барботаж), воды в аккумуляторе паром, получившее название *барботажной деаэрации*. Для этого в аккумуляторе устанавливаются соответствующие устройства. Интенсивно перемешивая воду и поддерживая ее в состоянии кипения, барботаж пара способствует достижению более полного удаления растворенных в ней газов и большей степени разложения бикарбонатов. К недостатку барботажной деаэрации следует отнести необходимость в расходе пара повышенного давления.

Конструкция и режим эксплуатации деаэраторов должны удовлетворять ряду требований, из которых необходимо отметить следующие:

1. Температура деаэрированной воды должна быть равна температуре насыщения, соответствующей давлению в деаэраторе. Для атмосферных деаэраторов нормально температура деаэрированной воды составляет $377,3$ °К при $P = 1,2 \cdot 10^5$ Па. При контроле работы деаэратора необходимо, следовательно, учитывать не только температуру деаэрированной воды, но и абсолютное давление в деаэраторе. Следует иметь в виду, что манометры показывают избыточное давление, а температура кипения воды в деаэраторе зависит от абсолютного давления, равного сумме показаний манометра и барометра.

2. Количество греющего пара, подаваемого в деаэратор, должно соответствовать потребности его в тепле, чтобы обеспечить непрерывное поддержание деаэрируемой воды в состоянии кипения. Недостаточное количество пара вызывает падение давления в деаэраторе и ухудшение эффекта деаэрации воды. Наилучшим образом это требование выполняется при автоматическом регулировании работы деаэраторов.

3. Деаэрируемая вода должна подвергаться достаточно тонкому дроблению с целью образования максимальной поверхности воды, контактирующей с паром. Это необходимо не только для улучшения условий теплообмена между водой и паром, но и для ускорения процесса выделения из воды растворенных в ней газов. Для увеличения свободной поверхности воды в современных деаэраторах используются различные приемы. Наибольшее распространение получили струйные деаэраторы, в которых вода разделяется на мелкие струи при помощи дырчатых тарелок. Применяются также пленочные деаэраторы, в которых вода разделяется на тонкие пленки. Один из приемов образования пленок заключается в том, что в колонку загружаются мелкие элементы: кольца, различным образом изогнутые пластинки, цилиндрики, образующие насадку. Вода, поступающая в насадку, разделяется на тонкие пленки, стекающие по поверхности элементов.

4. Должна быть обеспечена достаточная вентиляция колонки деаэратора с целью полного отвода из нее неконденсирующихся газов и обеспечения тем самым минимального парциального давления этих газов в верхней части колонки. Это достигается непрерывным отводом из колонки

парогазовой смеси, называемой *выпаром*. Количество или размер выпара оказывает существенное влияние на эффект дегазации. Для обеспечения устойчивой деаэрации воды расход выпара должен быть не меньше 1,5 – 2 кг на 1 т деаэрируемой воды. При наличии в деаэрируемой воде свободной и связанной углекислоты расход выпара увеличивается до 2 – 3 кг/т.

5. При параллельной работе нескольких деаэраторов важно обеспечить в них одинаковое давление, чтобы устранить перетекание воды из одного бака-аккумулятора в другой. Это достигается соединением паровых объемов деаэраторов друг с другом уравнительными линиями или подачей пара в колонки из общего паропровода достаточно большого диаметра, в котором поддерживается постоянное давление.

Весьма существенным для работы деаэратора являются гидравлическая нагрузка и температура деаэрируемой воды, определяющие его характеристику.

При низкой температуре деаэрируемой воды, недостаточном сечении отверстий для прохода пара и высокой гидравлической нагрузке могут возникнуть в колонке гидравлические удары. При их появлении необходимо уменьшить гидравлическую нагрузку деаэратора.

Глубокое удаление из воды CO_2 частичное разложение NaHCO_3 в деаэраторе атмосферного типа без барботажа могут быть достигнуты, если в греющем паре концентрация CO_2 не более 3 – 5 мг/л, длительность пребывания воды в баке-аккумуляторе менее 15 мин и бикарбонатная щелочность деаэрируемой воды не менее 0,3 мг-экв/л. В противном случае необходимо применение барботажной деаэрации. Повышенное содержание кислорода и CO_2 в деаэрированной воде может обуславливаться многими причинами, из которых наиболее существенны следующие: недостаточный размер выпара; нагрузка колонки превышает допустимую данной температуре воды перед колонкой; подача в бак-аккумулятор помимо колонки конденсата, содержащего кислород; подкачка в колонку производственного или дренажного конденсата порциями; подача в колонку относительно «холодных» потоков с повышенной концентрацией O_2 на вторую или третью тарелку; поступление на вторую тарелку перегретого конденсата; неисправность внутренних устройств колонки; подача выпара многих деаэраторов в один сборный коллектор; нарушение режима работы колонки (частые падения давления и т. п.).

2.6.2.3 Вакуумная деаэрация

Для современных электростанций деаэрация при температуре более 373 °К является основным методом удаления из воды коррозионно-агрессивных газов. Однако существуют потребители, которые требуют воду с температурой более 373 °К. К ним относятся, например, котельные агрегаты низкого давления и малой мощности, системы горячего водоснабжения и др. В этом случае приемлемым способом может оказаться дегазация воды

под вакуумом. Сущность этого способа состоит в том, что в деаэраторе создается и постоянно поддерживается вакуум. Величина его зависит от температуры деаэрированной воды, которую желают получить: чем ниже температура, тем больше вакуум, поддерживать который на заданном уровне не совсем просто. Тем не менее, вакуум-деаэраторы находят широкое применение. Конструкция их в общем аналогична на рассмотренной (см. рисунок 27).

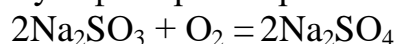
Мощными вакуумными деаэраторами на электростанциях являются конденсаторы турбин, вакуум в которых поддерживается на уровне 95 – 97%. Поэтому на современных блочных электростанциях подпиточная вода направляется в конденсатор.

2.6.3 Химическое обескислороживание воды

2.6.3.1 Сульфитирование

Химическое обескислороживание воды реагентным способом основано на связывании растворенного в ней кислорода веществами, способными вступать с ним в интенсивное химическое взаимодействие в условиях водного раствора. К числу таких веществ, нашедших промышленное применение, относятся сульфит натрия Na_2SO_3 и гидразин N_2H_4 .

В основе обработки воды сульфитом натрия (сульфитирование воды) находится реакция окисления сульфита растворенным в воде кислородом



При этом важно, чтобы такая реакция была завершена за время прохода воды от места ввода сульфита до защищаемого оборудования, в частности экономайзера котельного агрегата. Для этого необходимо температуру воды поддерживать не ниже $353 \text{ }^\circ\text{K}$ и избыток сульфита не меньше 2 мг/л. Сульфит натрия подают в воду в виде 3 – 6 %-ного раствора при помощи дозаторов.

При определении расхода технического сульфита следует учитывать кристаллизационную воду ($\text{Na}_2\text{SO}_3 \times 7\text{H}_2\text{O}$).

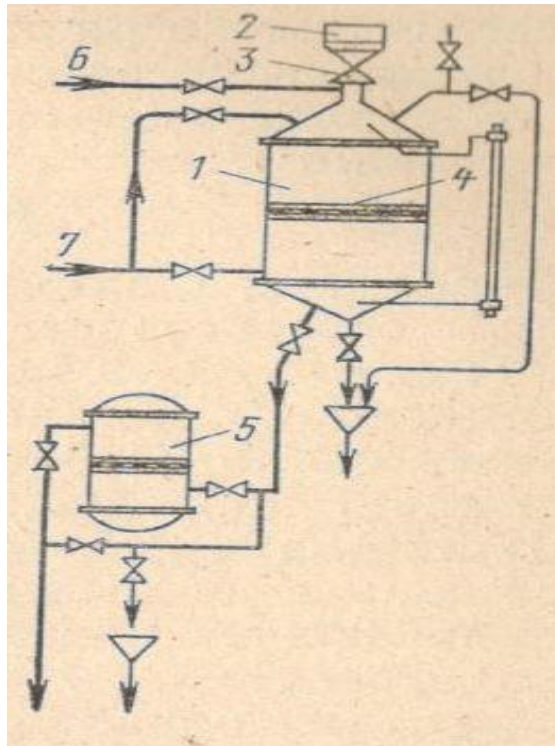


Рисунок 28 – Схема установки для приготовления раствора сульфита

1 – растворитель; 2 – воронка; 3 – задвижка; 4 – решетка; 5 – матерчатый фильтр; 6 – подача воды; 7 – продувка паром.

Раствор сульфита поглощает кислород воздуха и переходит в инертный сульфат. Поэтому при приготовлении и хранении раствора Na_2SO_3 принимаются меры к изоляции его от воздуха. На рисунке 28 приведена примерная схема установки для приготовления раствора сульфита. Кристаллический сульфит натрия загружается в растворитель 1 через воронку 2 и задвижку 3, в котором он задерживается на решетке 4. Перед заполнением водой 6 растворитель продувается паром 7 для удаления воздуха. Для ускорения растворения в нижнюю часть растворителя подается пар для подогрева и перемешивания раствора. Приготовленный раствор пропускается через матерчатый фильтр 5 и далее подается в дозаторы.

Сульфитирование обладает рядом достоинств: оно просто в осуществлении, доступно для многих мелких потребителей и не требует громоздкой и дорогой аппаратуры. Недостатком сульфитирования является то, что оно увеличивает сухой остаток, питательной воды примерно на 12 мг на 1 мг растворенного кислорода. Так как в исходных водах концентрация кислорода достигает 8 – 10 мг/л, то общее повышение сухого остатка может составить 100 – 120 мг/л. Поэтому на некоторых промышленных электростанциях сульфитирование питательной воды применяется для связывания остатков кислорода после термических деаэраторов, т. е. для дообескислороживания воды.

2.6.3.2 Обработка воды гидразином

Для предупреждения коррозии современного теплосилового оборудования высоких и закритических параметров широкое применение нашел гидразин N_2H_4 , являющийся сильным восстановителем. Он выпускается в виде гидразингидрата $N_2H_4 \cdot H_2O$ и гидразинсульфата $N_2H_4 \cdot H_2SO_4$. Первый реагент – бесцветная жидкость, легко поглощающая из воздуха CO_2 , O_2 и влагу, имеет слабо щелочные свойства; второй является твердым веществом, плохо растворимым в холодной воде, обладает кислыми свойствами.

Гидразин связывает растворенный в воде кислород по реакции $N_2H_4 + O_2 \rightarrow N_2 + 2H_2O$, которая идет с заметной скоростью только при температуре $373 \text{ }^{\circ}K$, этому способствует также и повышенное значение рН.

При рН = 9 – 9,5, $t = 376 – 378 \text{ }^{\circ}K$ и избытке гидразина примерно 20 мкг/кг для полного связывания O_2 требуется около 2 – 3 с. При рН < 7 гидразин не предупреждает коррозию, несколько даже усиливает ее. Гидразингидрат не увеличивает сухого остатка питательной воды и не дает вредных летучих продуктов распада, что позволяет применить его для прямоточных котельных агрегатов. Гидразинсульфат может использоваться только для барабанных котельных агрегатов.

Обработка воды гидразином заключается в непрерывном дозировании в обескислороживаемую воду необходимого количества гидразина. При этом происходит не только связывание кислорода, но и восстановление присутствующих в воде окислов металлов.

Гидразин может быть использован для борьбы с нитритной коррозией в котельных агрегатах высокого давления. Он применяется для консервации котельных агрегатов и других тепловых аппаратов, а также при гидразинно-кислотной очистке. Гидразин вводят в котельный агрегат в виде раствора определенной концентрации с помощью насосов-деаэраторов. Следует иметь в виду, что гидразин и его растворы ядовиты и при работе с ними необходимо иметь требуемые средства защиты (очки, респиратор, перчатки) и строго соблюдать правила безопасной работы с ним.

2.7 Отложения в котлоагрегатах и теплообменниках, их предотвращение и удаление

2.7.1 Состав, свойства и количество отложений

В результате воздействия тепла и реагентов, а также вследствие упаривания в котловой воде протекают различные физико-химические процессы, обуславливающие разрушение одних соединений и образование других. Во многих случаях это ведет к возникновению труднорастворимых веществ, которые и выделяются из пересыщенных растворов в виде осадка, образующего при некоторых условиях накипь или шлам.

Накипью называют достаточно плотные отложения, возникающие на поверхности нагрева или охлаждения и способные нарушать нормальную работу котельного агрегата или теплообменника. Рыхлые отложения, получающиеся в результате оседания, скопления и уплотнения взвешенных веществ, образовавшихся в воде, называются шламовыми или просто *шламом*. Часто шламом называют также образующийся в воде осадок (взвесь) и илестые скопления в барабанах котельных агрегатов, коллекторах экранов и в различных баках. Накипные и шламовые отложения в равной мере опасны для работы котельных агрегатов.

Отложения могут быть описаны их физическими свойствами и химическим составом. Из физических свойств отмечают цвет, твердость, силу сцепления с поверхностью металла, толщину, равномерность распределения по поверхности, место расположения в аппарате. Для характеристики химического состава отложений обычно указывают процентное содержание в них CaO , MgO , CuO , SO_3 , SiO_2 , Fe_2O_3 , Fe_3O_4 , Al_2O_3 , P_2O_5 , а также количество летучих соединений, приводимых в анализах вед рубрикой «потери при проектировании».

Для эксплуатации важно знать состав отложений, так как он часто позволяет вскрыть причину их образований. Химический анализ позволяет узнать род окислов и их относительное количество. Он не дает, однако, указаний на то, какие именно соединения входят в состав отложений. Ответ на этот вопрос может быть получен при помощи более сложных методов анализа, из которых следует отметить рентгенографический, кристаллооптический и термографический.

Химический состав накипей, образующихся в паровых котельных агрегатах, весьма разнообразен. Однако они гут быть разделены на следующие четыре группы:

1. *Щелочноземельные накипи*, состоящие в основном из соединений кальция и магния. К таким соединениям относятся: CaCO_3 , CaSO_4 , CaSiO_3 , $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, MgO , $\text{Mg}(\text{OH})_2$, $\text{Mg}(\text{PO}_4)_2$. В зависимости от того, какие из этих соединений преобладают, различают накипи карбонатные CaCO_3 , сульфатные CaSO_4 , фосфатные $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ и т.д. Возможны накипи

смешанного типа, когда многие соединения присутствуют в небольшом количестве.

2. *Железистые накипи*, состоящие из соединений железа. В состав этого рода отложений могут входить ферросиликаты железа, фосфаты железа $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$, феррофосфат натрия NaFePO_4 и окиси железа Fe_2O_3 , Fe_3O_4 .

3. *Медные накипи*, содержащие значительную долю меди.

4. *Силикатные накипи*, имеющие различный состав.

Наиболее важным свойством накипных отложений является их малая теплопроводность, которая изменяется в зависимости от структуры и пористости отложений, примерно от 0,12 до 1,2 Вт/(м·К).

Непосредственным результатом образования накипи является повышение температуры стенки обогреваемой трубы.

При достаточно высоком тепловом потоке ($\geq 250 \cdot 10^3$ Вт/м²) опасный перегрев металла достигается уже при толщине отложений 0,1 – 0,2 мм.

Опыт эксплуатации показывает, что не все вещества, проникающие в котельный агрегат, остаются в нем в виде шлама или накипи. Часть их, значительно большая, выводится с продувочной водой.

2.7.2 Образование отложений в паровых котельных агрегатах

2.7.2.1 Образование щелочноземельных отложений

Для образования щелочноземельных отложений необходимо наличие в котловой воде достаточно высокой концентрации накипеобразователей, т.е. труднорастворимых соединений. Если в ней присутствуют катионы Ca^{2+} и Mg^{2+} и анионы OH^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , SiO_3^{2-} , то при некоторых условиях в результате их взаимодействия можно ожидать образования одного или нескольких из следующих труднорастворимых соединений: CaCO_3 , CaSO_4 , CaSiO_3 , $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$, $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$, $3\text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$.

Однако выпадение этих соединений в осадок становится возможным лишь при некоторых условиях. Одно из них состоит в том, что произведение концентраций находящихся в растворе ионов труднорастворимого вещества при данной температуре есть величина постоянная, т. е.

$$C_{\text{K}} C_{\text{АН}} = \text{ПР} \quad (11)$$

где C_{K} , $C_{\text{АН}}$ – концентрация соответственно катиона и аниона труднорастворимого соединения, г-ион/кг; ПР – постоянная величина, именуемая *произведением растворимости*.

При $C_{\text{K}} C_{\text{АН}} > \text{ПР}$ выпадение осадка неизбежно, если же $C_{\text{K}} C_{\text{АН}} < \text{ПР}$, то раствор не насыщен и осадок не образуется. Для возникновения осадка, например CaCO_3 , совсем необязательна высокая концентрация Ca^{2+} в растворе.

Осадок может появиться и при малом значении $C_{\text{Ca}^{2+}}$, если концентрация аниона CO_3^{2-} будет столь высокой, что возникает неравенство $C_{\text{Ca}^{2+}} \cdot C_{\text{CO}_3^{2-}} > \text{ПР}_{\text{CaCO}_3}$.

Понижение растворимости некоторых солей с повышением температуры раствора также служит причиной возникновения труднорастворимых соединений.

2.7.2.2 Образование железистых отложений

Развитие за последние годы техники и технологии обработки воды и повышение технического уровня эксплуатации, привело к практически полному устранению щепи поземельных накипей в паровых котельных агрегатах современных электростанций и промышленных котельных. Однако стали обнаруживаться отложения другого типа, основными составляющими в которых явились окислы железа, металлическая медь и фосфаты. Доля окислов железа в подобного рода отложениях достигает 60 – 70 %, а в некоторых случаях и более. Наиболее отчетливо образование железистых накипей обнаруживается в экранных трубах солевых отсеков, на теплонапряженных участках труб (в зоне горелок, выше и ниже зажигательного пояса, в местах наброса факела горелки и т. п.). Чаще они отмечаются в котельных агрегатах высоких параметров. Отложения концентрируются преимущественно на полупериметре трубы, обращенной в топку.

Основными компонентами железистых отложений в зависимости от условий их образований являются окислы железа или фосфаты железа. Общей причиной образования рассматриваемых накипей является поступление в котельный агрегат железа с питательной водой, в которую оно попадает в результате коррозионных процессов, протекающих в водоконденсатном тракте электростанций и промышленных котельных. Скорость образования железистых отложений, сильно зависящая от теплонапряжения поверхности нагрева.

Это необходимо иметь в виду при переводе котельных агрегатов на работу с высококалорийным топливом (природный газ, мазут) или с форсированными режимами топки.

Железофосфатные отложения возникают на теплонапряженных парогенерирующих трубах и чаще всего в солевых отсеках барабанных котельных агрегатов, если концентрация фосфатов PO_4^{3-} здесь достаточно высока (≥ 80 мг/кг). Ввиду этого «Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей (ПТЭС)» концентрация PO_4^{3-} в солевых отсеках ограничивается не некоторым предельным значением. Образование железистых отложений на внутренних поверхностях котельных агрегатов становится возможным также и при низких значениях рН котловой воды. Такие условия могут создаваться при вводе в котельный агрегат малых фосфатов без должного контроля. В этом случае наблюдается также и язвенная коррозия металла труб, обуславливающая возникновение наряду с железистыми и железистыми отложениями.

2.7.2.3 Образование медных отложений

Отдельные виды накипей могут содержать в средней 20 – 30 % и более меди. Такие накипи получили название медных. Кроме меди в них содержатся также окислы железа и в качестве второстепенных примесей – соединения кальция и магния. Образование медных накипей отмечается в котельных агрегатах различного давления, но всегда на участках с высокой тепловой нагрузкой ($\geq 200 \cdot 10^3$ Вт/м²) и преимущественно на полупериметре трубы, обращенном в топку. Основой образования медных отложений является поступление соединений меди в котельный агрегат с питательной водой. Медь в отложениях присутствует в металлическом состоянии и форме окислов. Отмечено, что в слое отложений она распределяется неравномерно: доля ее убывает в направлении от поверхности слоя к стенке трубы (от 70 – 90 до 10 – 15%).

2.7.3 Образование отложений в прямоточных котельных агрегатах

Прямоточные котельные агрегаты работают, как известно, без продувки. Поэтому все нелетучие вещества, вступающие в прямоточный бесепараторный котельный агрегат с питательной водой, могут оставаться в нем в виде отложений или уноситься с паром в турбину. С ростом давления увеличивается и растворяющая способность пара, что обуславливает и рост доли веществ, выносимых паром из котла.

В настоящее время широкое применение нашли прямоточные котельные агрегаты сверхкритического давления (СКД) 25,5 МПа, являющиеся основой энергетических блоков мощностью 300, 500, 800 и 1200 МВт, которыми и комплектуются современные электростанции. Рабочий процесс в этих котельных агрегатах отличается значительным изменением по тракту плотности, температуры и энтальпии среды (воды), а также и растворимости содержащихся в ней веществ. На пути этих изменений имеется область, в которой сравнительно небольшое увеличение температуры вызывает сильное падение плотности и возрастание энтальпии

теплоносителя. В этой области, именуемой областью *максимальной теплоемкости* (или *квазифазового перехода*), наблюдается и значительное снижение растворимости многих веществ (CuO, SiO₃²⁻, Mg(OH)₂, CaSO₄ и др.). Естественно, поэтому, что отложения накипеобразующих соединений (кальция, магния и окислов железа) распределяются по тракту котельного агрегата в соответствии с изменением их растворимости и более интенсивно образуются в зоне квазифазового перехода. Железоокисные отложения сосредотачиваются на полупериметре трубы, обращенном в топку, в наиболее теплонапряженной нижней радиационной части котельного агрегата. Высокие тепловые нагрузки, равные $(4 - 5) \cdot 10^5$ Вт/м², и наличие железа в питательной воде ($\geq 8 - 10$ мкг/кг) интенсифицируют образование железоокисных отложений, что вызывает рост температуры стенки трубы, ведущий к ее аварии.

Прямоточные котельные агрегаты питаются конденсатом турбин с небольшой (1 – 2%) добавкой обессоленной воды или дистиллята. Следовательно, водяная плотность конденсаторов турбин является основным фактором, определяющим вероятность образования щелочноземельных отложений в прямоточных котельных агрегатах. Что касается железистых отложений, то при современном уровне техники образование их в некотором количестве представляется неизбежным. Однако существуют способы, использование которых позволяет свести их к допустимому минимуму.

2.7.4 Методы борьбы с отложениями в котельных агрегатах с естественной циркуляцией

2.7.4.1 Общие положения

Для предотвращения образования в барабанных котельных агрегатах накипи используются следующие меры:

- а) глубокое умягчение добавляемой в питательную систему воды;
- б) предотвращение загрязнений питательной воды и ее составляющих продуктами коррозии конструкционных материалов;
- в) устранение присосов охлаждающей воды в конденсаторах турбин;
- г) организация внутрикотловой (коррекционной) обработки воды и поддержание рационального химического режима котловой воды;
- д) устранение местных высоких тепловых нагрузок парогенерирующих труб.

Следует отметить, что во многих случаях при умягчении воды не удается полностью удалить из нее накипеобразователи. Остаточная жесткость умягченной воды обычно составляет 3 – 4 мкг-экв/кг, нередко и выше. Внутрикотловая или коррекционная обработка воды имеет целью обезвредить попавшие в котельный агрегат накипеобразователи, не дать им отложиться на поверхности нагрева в виде накипи. Для этого в котельный агрегат вводят соли ортофосфорной кислоты (фосфатирование) или этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА, трилонирование).

2.7.4.2 Фосфатирование котловой воды

Поступающие в котельный агрегат катионы Ca^{2+} и Mg^{2+} способны давать труднорастворимые соединения с различными анионами, присутствующими в котловой воде. Эти соединения по разному ведут себя в условиях котловой воды. Одни из них (CaSO_4 , CaSiO_3) выделяются из раствора главным образом на поверхности парогенерирующих труб в виде накипи, другие (CaCO_3 , $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2$) выпадают преимущественно в форме взвеси, образующей осадок (шлам), удаляемый из котельного агрегата продувкой. Фосфатирование имеет целью создать в котловой воде условия, при которых накипеобразователи выделялись бы в форме неприкипающего шлама. Оно является средством предупреждения образования кальциевой

накипи, а не накипи вообще, поскольку трифосфат магния $Mg_3(PO_4)_2$ способен давать накипные отложения.

В практике эксплуатации котельных агрегатов с естественной циркуляцией применяют два режима фосфатирования: фосфатно-щелочной и режим чисто фосфатной щелочности.

Первый состоит в том, что в котловой воде создается и непрерывно поддерживается определенная концентрация ионов PO_4^{3-} и «свободных» (т.е. не связанных с PO_4^{3-}) гидроксильных ионов OH^- . Второй режим предполагает присутствие в котловой воде только ионов PO_4^{3-} и связанных с ним ионов OH^- . Такое условие достигается при наличии в воде одного тринатрийфосфата.

Для осуществления фосфатирования используются тринатрийфосфат Na_3PO_4 , триполифосфат $Na_5P_3O_{10}$, гексаметафосфат $(NaPO_3)_6$. Полифосфаты $Na_5P_3O_{10}$ и $(NaPO_3)_6$ являются потенциально кислыми, так как в водных растворах гидролизуются с образованием моно- и динатрийфосфатов (NaH_2PO_4 , Na_2HPO_4). Поэтому при использовании NaH_2PO_4 и Na_2HPO_4 , а также и полифосфатов необходимо, чтобы котловая вода обладала достаточной щелочностью для их нейтрализации. Для поддержания режима чисто фосфатной щелочности применяют обычно смесь тринатрийфосфата (ТНФ) и одного из кислых фосфатов, например гексаметафосфат $(NaPO_3)_6$ (ГМФ). Соотношение реагентов принимается таким, чтобы смесь отвечала соединению Na_2HPO_4 . Применение кислых фосфатов обуславливается тем, что с питательной водой могут поступать ионы HCO_3^- или CO_3^{2-} , которые в котельном агрегате дают свободные ионы OH^- . Их нейтрализация и должна осуществляться ионами HPO_4^{2-} .

Осуществление на практике режима чисто фосфатной щелочности в котельных агрегатах сверхвысокого стлжения (15,0 МПа), питаемых обессоленной водой, связано с некоторыми трудностями, так как при этом режиме возникает почти безбуферная среда, поддерживать и контролировать которую практически невозможно. Это влечет за собой появление в разных местах чистого отсека областей с рН от 7 до 9,8. При длительном осуществлении такого режима (с дозировкой кислых фосфатов) в экранных трубах на участках с высоким тепловым потоком на некоторых электростанциях обнаруживались железозфосфатные отложения, а под ними - язвенная коррозия.

Следует обратить внимание на то, что гидроксилпатит содержит два иона OH^- . Поскольку при фосфатировании мы желаем получить именно это соединение, то необходимо, чтобы среда обладала достаточной концентрацией этих ионов, т. е. имела $pH \geq 8,5$. Несоблюдение этого приводит, как указывалось выше, к возникновению железозфосфатных отложений.

Режим чисто фосфатной щелочности применяется при питании котельных агрегатов конденсатом с добавкой дистиллята или обессоленной

воды; фосфатно-щелочной – при добавке химически обработанной воды. Фосфатирование целесообразно применять для всех барабанных котельных агрегатов давлением более 1,6 МПа. Однако необходимо иметь в виду, что лучшим способом предотвратить образование кальциевых накипей является питание котельных агрегатов водой, лишенной кальция. Поэтому наряду с фосфатированием следует стремиться к всемерному снижению жесткости питательной воды.

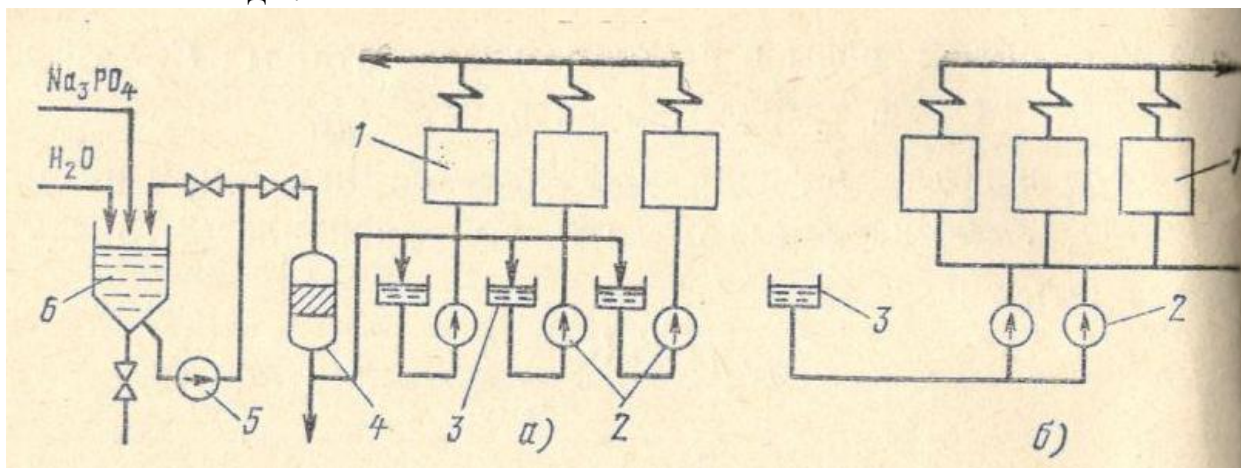


Рисунок 29 – Схемы ввода фосфата в котельный агрегат

а – индивидуальная; б – групповая; 1 – котельный агрегат; 2 – насос-дозатор; 3 – расходный бак; 4 – фильтр; 5 – насос; 6 – бак-мешалка для приготовления раствора.

Фосфат вводится в котельный агрегат *1* в виде раствора определенной концентрации по двум схемам: индивидуальной и групповой (рисунок 29). Последняя более пригодна для небольших промышленных котельных. Раствор фосфата концентрацией 6 – 8 % готовится в гидравлической мешалке *6* на горячей умягченной, питательной воде или конденсате. При использовании холодной воды раствор подогревается паром. Приготовленный (первичный) раствор фосфата с помощью насоса *5* пропускается через осветлительный фильтр *4* и подается далее в расходные баки *3*, в которых он разбавляется до рабочей концентрации, зависящей от подачи насоса-дозатора *2* и расхода фосфата.

2.7.4.3 Обработка котловой воды комплексоном

Фосфатирование не предотвращает железоокисных и медистых отложений. Оно связано с образованием в котловой воде шлама, которое всегда следует учитывать. Таким образом, фосфатный режим может быть безнакипным, но не бесшламовым. Нередко же фосфаты сами являются источником возникновения отложений (железофосфатных и др.). В отличие от фосфатирования обработка котловой воды комплексоном может обеспечить безнакипный и бесшламовый режимы котловой воды, а при

некоторых условиях – и бескоррозионный. Существует класс веществ, которые называются комплексными или комплексонами. В качестве их представителя можно привести ставшую широко известной этилендиаминтетрауксусную кислоту (ЭДТА), двузамеченная натриевая соль которой получила название «трилон Б».

Процесс трилонирования барабанных котельных агрегатов состоит в том, что в питательную воду (во всас питательных насосов) вводят $\leq 1,5\%$ -ный раствор трилона Б, предварительно подщелоченный NaOH или какипеобразователей в прочное хорошо растворимое сочинение сложного строения (комплексонат). В результате шламо- и накипеобразующие соединения не возникают, чем и обеспечивается безнакипный режим работы котельных агрегатов. Трилонирование, связывая железо в комплекс, уменьшает вынос его паром, что позволяет снизить концентрацию железа в конденсате. Вынос с паром железа в сравнении с режимом фосфатирования при комплексонной обработке снижается на 50% и более.

Задачи и результаты комплексонной обработки зависят от температуры котловой воды и показателей качества питательной воды. Наиболее высокие концентрации в питательной воде кальция, магния и железа свойственны котельным агрегатам среднего давления 4,0 МПа. В этих условиях основной задачей коррекционной обработки является предотвращение щелочноземельных и железистоокисных отложений. Питательная вода котельных агрегатов СВД (15,5 МПа) обычно глубоко умягчена, т. е. обладает минимальной жесткостью. В этом случае основной задачей комплексонной обработки является предотвращение железистоокисных отложений в котельном агрегате, уменьшение выноса окислов паром и защита от пароводяной коррозии. Котельные агрегаты давлением 10,0 МПа занимают промежуточное положение, однако процессы, протекающие в них при комплексонной обработке, больше приближаются к таковым для котельных агрегатов СВД. При высоком качестве питательной воды (добавка дистиллята или обессоленной воды) результаты комплексонной обработки будут примерно те же, что и в котельных агрегатах давлением 15,5 МПа.

2.7.4.4 Щелочение котловой воды

При щелочном режиме попадающие в котельный агрегат накипеобразователи выпадают в виде CaCO_3 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Карбонат кальция в нещелочной среде (например, в конденсаторах турбин) выделяется на поверхности нагрева или охлаждения с образованием плотной накипи. В условиях щелочной котловой воды карбонат кальция выпадает в форме неприкипающего шлама.

Для получения удовлетворительных результатов при этом режиме необходимо поддерживать определенную щелочность котловой воды.

Щелочной режим котловой воды эффективен только для котельных агрегатов с рабочим давлением пара до 1,6 МПа. Это объясняется тем, что устойчивость карбонатного иона CO_3^{2-} зависит от температуры, с повышением которой происходит разложение соды. В результате эффективность щелочного режима снижается, а пар загрязняется углекислотой.

Загрязнение пара углекислотой весьма нежелательно, поскольку это вызывает углекислотную коррозию металла конденсатного тракта. Щелочной режим котловой воды обычно используется для котельных агрегатов малой производительности, работающих с теплонапряжением не более 10^5 Вт/м².

Использовать щелочной режим следует в тех случаях, когда исключены возможности применить более совершенные способы борьбы с накипеобразованием.

2.7.5 Предотвращение образования отложений в прямоточных котельных агрегатах

Обеспечение безнакипного состояния внутренних поверхностей нагрева прямоточных котельных агрегатов сводится к устранению источников загрязнения питательной воды, основными из которых являются коррозионные процессы в пароконденсатном тракте присосы охлаждающей воды в конденсаторах турбин, борьба с ними и составляет одну из основных задач эксплуатационного персонала электростанции.

Попадание охлаждающей воды в межтрубное пространство конденсаторов паровых турбин называется присосом.

Для достижения высокой водяной плотности конденсаторов турбин вальцовочные соединения трубок с трубной доской уплотняются специальными обмазками, которые должны обладать хорошим сцеплением с металлом (адгезией), эластичностью и долговечностью. Задача полного устранения присосов охлаждающей воды в конденсаторах является весьма трудной, так как достаточно небольших неплотностей в огромном количестве этих соединений или в трещинах в стенке трубок, чтобы концентрация загрязнений в конденсаторе превысила установленные нормативы. Поэтому на современных мощных энергоблоках, оборудованный прямоточными котельными агрегатами СКД (25,5 МПа), устанавливаются блочные обессоливающие установки (БОУ) (см. п. 2.3.6), удаляющие попавшие в турбинный конденсат ионные и дисперсные загрязнения. Глубокая очистка всего турбинного конденсата на БОУ является непременным условием обеспечения надежного водного режима котельных агрегатов СКД.

Не менее важным условием является и устранение или снижение коррозии водоконденсатного тракта энергоблока, которая обуславливает обогащение питательной воды окислами железа и меди, образующими отложения в котельном агрегате и турбине.

Железоокисные отложения в котельных агрегатах образуются преимущественно в их нижней радиационной части (НРЧ), которая воспринимает высокие тепловые потоки. Отложения располагаются в основном на полупериметре трубы, обращенном в топку. Рассредоточение этих отложений по другим поверхностям нагрева существенно улучшило бы условия работы труб НРЧ и увеличило бы межпромывочный период работы котельного агрегата.

Обработка питательной воды комплексом (ЭДТА) позволяет устранить сосредоточение железоокисных отложений в НРЧ. В основе такого действия ЭДТА находятся закономерности термического распада (термолиза) комплексонов железа, идущего с выпадением магнетита на стенках труб. Процесс термолиза растягивается по тракту котельного агрегата таким образом, что основное количество магнетита выпадает до НРЧ. В условиях эксплуатации отмечается выпадение до 70 – 80 % окислов железа в экономайзерной части. Отложения магнетита в НРЧ обладают плотной структурой, прочно сцеплены с металлом и имеют теплопроводность, в 3 – 4 раза превышающую теплопроводность отложений, возникающих при обычных режимах. Уменьшение скорости образования железоокисных отложений в НРЧ косвенно подтверждается тем, что скорость роста температуры стенки труб при трилонировании становится меньше в 2,5 – 3 раза, чем при традиционном (без трилонирования) режиме. Отмечается также снижение в 1,5 – 2 раза количества отложений в турбине. Обработка питательной воды трилоном не является единственным способом снизить или предотвратить образование железоокисных отложений в НРЧ. Существуют и другие способы, режимы, которые позволяют получить аналогичные результаты.

2.7.6 Предотвращение образования отложений в конденсаторах паровых турбин

На электростанциях и различных промышленных предприятиях вода в больших количествах используется в качестве охладителя. При этом вследствие ограниченного дебита источника водоснабжения и в целях экономии воды часто применяют оборотную систему водоснабжения, в которой охлаждающая вода циркулирует по замкнутому циклу, нагреваясь в охлаждаемых аппаратах и охлаждаясь в бассейне (или градирне), где она разбрызгиваемая. При этом круговороте воды в ней протекают различные процессы. При разбрызгивании происходит удаление из воды растворенной CO_2 и вследствие этого распад бикарбоната кальция по реакции



Именно этот процесс является причиной образования твердых карбонатных отложений в трубках конденсаторов турбин. Наряду с этим вода частично испаряется и концентрация растворенных в ней веществ увеличивается. Происходит упаривание воды, степень которого характеризуется коэффициентом упаривания.

В эксплуатации стремятся работать с небольшим коэффициентом упаривания, что заметно уменьшает интенсивность накипеобразования. Достигнуть этого можно продувкой системы.

Вода, удаляемая продувкой из системы, заменяется в том же объеме добавляемой.

Продувка оборотной системы осуществляется двумя путями: часть воды уносится воздухом в виде капелек, другая выводится организованно и является собственно продувкой.

Предотвращение образования карбонатных накипей в конденсаторах турбин достигается путем обработки добавляемой воды одним из следующих способов: подкислением, известкованием, фосфатированием, декарбонизацией.

При подкислении в добавляемую воду вводят обычно серную кислоту. При этом происходит разрушение иона HCO_3^- с образованием CO_2 .

Вследствие этого карбонатная жесткость воды уменьшается, а концентрация свободной углекислоты возрастает. Все это приостанавливает распад бикарбоната кальция. При осуществлении подкисления весьма важно правильно выбрать дозу кислоты. Большая доза увеличивает коррозионную агрессивность воды, малая – не обеспечивает безнакипного режима.

Обработка воды известью $\text{Ca}(\text{OH})_2$ также приводит к разрушению иона HCO_3^- , однако без образования CO_2 .

В отличие от подкисления, при котором разрушается лишь небольшая часть ионов HCO_3^{2-} , известкованием удаляются все бикарбонатные ионы из всего потока воды. Известкование сравнительно редко употребляется для обработки оборотной воды, так как это связано с сооружением специальной установки, требующей больших капиталовложений.

Фосфатирование основано на том, что введенные в воду фосфаты лишают карбонат кальция его накипеобразующих свойств. Процессы, происходящие при этом, пока недостаточно изучены. Существенно отметить, что свойство предупреждать образование карбонатных отложений фосфаты приобретают лишь при весьма малых концентрациях, около 3 – 4 мг/л PO_4^{3-} . Большие концентрации вызывают обратное действие: умягчение воды и выпадение шлама. В качестве реагентов применяют суперфосфат, тринатрийфосфат и гексаметафосфат. Последний реагент оказывается более эффективным, чем первые два. Однако преимущество ортофосфатов заключается в их большей доступности и дешевизне. Часто применяют комбинированную обработку воды – ортофосфатами и кислотой, если добавляемая вода обладает высокой карбонатной жесткостью.

Обработка воды газами, содержащими CO_2 , в частности топочными газами котельных агрегатов, имеет целью увеличить в ней концентрацию свободной углекислоты. Для этого газы продувают через слой обрабатываемой воды или смешивают их с водой при помощи водяного эжектора. Содержащаяся в газе CO_2 переходит при этом в раствор. Как и в случае подкисления, насыщение воды углекислотой прекращает распад бикарбонат-ионов. При обработке воды топочными газами существенную роль играет SO_2 .

Кроме минеральных (карбонатных), конденсаторные трубки часто обрастают органическими отложениями.

Они образуются различного рода микроорганизмами, которые поселяются на внутренних поверхностях трубок. Внешне отложения имеют вид слизистой или студенистой пленки серо-зеленых или бурых оттенков. Образование такого рода отложений также вызывает ухудшение вакуума. Борьба с обрастаниями трубок микроорганизмами ведется хлорированием охлаждающей воды, т. е. присадкой в нее хлора или хлорной извести. Хлор умертвляет (окисляет) микроорганизмы, что приводит к устранению органических отложений.

2.7.7 Предотвращение образования отложений в тепловых сетях

Электростанции (ТЭЦ) отпускают потребителям тепло в виде пара и горячей воды. Последняя подогревается на ТЭЦ в специальных подогревателях (бойлерах) и подается в тепловые сети, служащие для разводки горячей воды по потребителям. Количество подаваемой в тепловую сеть воды, называемое подпиткой, равно потере (утечке) воды через неплотности сети. Согласно ПТЭ среднегодовая утечка не должна превышать 0,25 % объема воды в трубопроводах теплосети и присоединенных к ним потребителей.

В современных тепловых сетях восполнение потерь производится химически обработанной водой, т. е. достаточно умягченной. Поэтому проблемы заноса трубопроводов и поверхностей нагрева таких тепловых сетей щелочноземельными отложениями не существует. Однако часто наблюдается загрязнение теплосетей железистоокисными отложениями, устранение образования которых представляет порой сложную задачу.

Основным источником поступления окислов железа в воду тепловой сети являются коррозионные процессы, протекающие в пределах самой водогрейной котельной (тракт до деаэратора, после него, баки-аккумуляторы) и в магистральных трубопроводах. Причина этого состоит в периодическом или непрерывном – неудовлетворительно деаэрированная подпиточная вода – попадании в тепловую сеть кислорода. Нередко в период пикового водоразбора в открытых системах подпитка осуществляется недостаточно деаэрированной водой. Все это способствует накоплению

окислов железа в системе. Поступивший в сеть кислород полностью расходуется на коррозию в радиусе около 1,5 – 2 км.

Применяемые меры для устранения желез окисных отложений можно разделить на две группы. Мероприятия первой группы направлены на снижение или полное прекращение поступления в тепловую сеть кислорода и углекислоты. К ним относятся: улучшение вакуумных деаэраторов подпиточной воды, подщелачивание сетевой воды, рациональный подвод воды в баки-аккумуляторы, устранение контакта зеркала воды в баках с паровоздушной смесью. Для борьбы с коррозией успешно используется раствор силиката натрия (жидкого стекла), концентрация в сетевой воде которого поддерживается на уровне 12 – 16 мг/кг SiO₂ при pH = 7,2 – 6,5.

Вторая группа мероприятий касается удаления накопившихся в оборудовании и трубопроводах окислов железа: кислотная очистка водогрейных котельных агрегатов и сетевых подогревателей, водовоздушная промывка сетевых подогревателей и местных систем отопления, консервация последних растворами силиката натрия.

2.7.8 Удаление образовавшихся отложений

Удаление образовавшихся в котельном агрегате или теплообменном аппарате отложений в зависимости от конкретных условий производится двумя способами: механическим и химическим. Механический способ основан на применении различных скребковых и режущих инструментов (шарошки, щетки и т. п.). Этот способ применим для небольших котельных агрегатов и простых теплообменников. Химический способ основан на использовании растворов химических реагентов – щелочей, кислот и комплексообразователей. Химические очистки котельных агрегатов делятся на предпусковые и эксплуатационные. Предпусковые очистки производятся на новых котельных агрегатах, вводимых в эксплуатацию после монтажа, и предназначены для удаления ржавчины, сварочного грата, окалины и других загрязнений. Эксплуатационные очистки служат для удаления разного рода отложений, образовавшихся в ходе эксплуатации оборудования.

Предпусковая химическая очистка современных мощных котельных агрегатов электростанций является обязательной. Она начинается интенсивной водной промывкой со скоростью 1,0 – 1,5 для дренируемых и 2 – 2,5 м/с недренируемых поверхностей вначале холодной (на сброс), а потом горячей водой (до 373 °К) по замкнутому контуру. Следующей операцией является щелочение (для удаления силикатов, масел и т. п.) 0,5 – 1,0 %-ным раствором NaOH для барабанных котельных агрегатов NH₄OH для прямоточных. Могут использоваться и другие реагенты (например, детергенты). За щелочением следует уже обработка реагентами, удаляющими окислы железа (ржавчину, окалину). При эксплуатационных очистках первые две операции опускаются.

К числу используемых реагентов относятся кислоты: соляная и ряд органических: лимонная, малеиновая и др., а также и ЭДТА. Наиболее доступной и дешевой является соляная кислота, которая часто и используется для химической очистки небольших котельных агрегатов промышленных котельных и теплообменных аппаратов, в том числе и конденсаторов турбин. Однако для мощных котельных агрегатов, особенно СКД, применение ее ограничено из-за агрессивных свойств и сложности схемы очистки. Органические кислоты менее агрессивны и обладают другими преимуществами перед HCl, однако расход их сравнительно большой, что удорожает промывку и вызывает затруднения с очисткой сбросных вод.

Поэтому наиболее приемлемыми оказались смеси (композиции) из ЭДТА и органической кислоты в соотношении примерно 1:1, хотя могут, использоваться и другие соотношения. Композиции ЭДТА с органической кислотой лучше всего с лимонной, как показывает опыт, обладают рядом преимуществ и наиболее часто используются в предпусковых очистках. При эксплуатационных промывках промывочные реагенты и композиции подбираются в зависимости от химического состава отложений, их свойств и структуры. Для перевода в комплексоны (в раствор) разных катионов требуются различные условия.

Композиции должны быть по возможности наименее агрессивны, обеспечивать хорошую очистку с малой затратой времени, а также обеспечивать перевод всех отложений в растворенное состояние и допускать сравнительно простое обезвреживание сбросных вод. Здесь следует также отдать предпочтение композициям ЭДТА с органической кислотой. После удаления отложений раствор вытесняется из котельного агрегата водой и его поверхности затем промываются для удаления остаточных загрязнений. За промывкой следует операция нейтрализации кислого реагента раствором щелочи. Заключительным является процесс пассивации поверхности металла. Для энергоблоков СКД применяют нитритно-аммиачную, гидразинно-аммиачную и комплексонную пассивацию.

Химическая промывка оборудования – весьма ответственная операция, которая должна проводиться опытным персоналом. Ей, предшествуют анализ отложений, выбор реагентов, составление технологической карты, режима и схемы промывки, монтаж этой схемы, порой сложной и громоздкой; схемы сбора растворов и способа их нейтрализации; схемы, режима, объема и методики химического контроля и т. д. Это делает химическую промывку дорогой и трудоемкой.

Использование комплексонов позволяет заметно упростить и удешевить эксплуатационные очистки. Одним из таких упрощенных способов является «очистка на ходу». Она основана на использовании свойств комплексонов образовывать хорошо растворимые комплексы со всеми катионами, присутствующими в воде паровых котельных агрегатов.

Если в барабанный котельный агрегат, загрязненный отложениями, начать вводить комплексон, то отложения эти будут постепенно растворяться и выводиться с продувкой. Однако, как уже отмечалось, удаление больших отложений этим способом может оказаться экономически невыгодным из-за высокой стоимости комплексона.

Для малых котельных агрегатов промышленных котельных может оказаться целесообразным применение щелочной (Na_2CO_3) или фосфатной (Na_3PO_4) выварки щелочноземельных отложений, которые при этом размягчаются, что облегчает их последующее удаление механическим путем.

2.8 Загрязнение пара и способы борьбы с ним

2.8.1 Унос веществ насыщенным паром

Качество вырабатываемого котельными агрегатами пара определяется количеством содержащихся в нем различных веществ – нелетучих и газообразных, которые рассматриваются как загрязнения. Оно характеризуется солесодержанием, под которым понимают общую концентрацию нелетучих веществ, выраженную в мг/кг (или мкг/кг) пара. Более часто качество пара характеризуется количеством содержащегося в нем Na , SiO_2 , CO_2 .

Вырабатываемый барабанными котельными агрегатами пар всегда содержит различные вещества, которые переходят в него из котловой воды. Явление перехода в пар веществ, присутствующих в котловой воде, называется *распределением* между жидкой и паровой фазами. Соотношение, в котором происходит это распределение, характеризуется общим коэффициентом распределения.

Различают коэффициент распределения истинный, видимый и общий. Истинный коэффициент распределения характеризует распределение определенной формы данного вещества (например, молекул); видимый коэффициент распределения определяет распределение всех форм данного вещества.

Значение истинного коэффициента распределения с увеличением давления и температуры возрастает.

Концентрация общего количества какого-либо вещества в паре, выраженное в мкг/кг, может быть названа *уносом*. Различают унос капельный и избирательный. Капельным уносом называют тогда, когда загрязнения поступают в пар преимущественно с капельками котловой воды, уносимыми им из барабана котельного агрегата. При капельном уносе количество содержащихся в паре различных веществ пропорционально их концентрации в котловой воде.

Капельки влаги возникают в барабане котельного агрегата главным образом в результате двух процессов: дробления воды и разрушения паровых

пузырей. Дробление воды обычно происходит при ударе поступающих в паровой объем барабана струй пароводяной смеси о различного рода щитки и перегородки внутрибарабанных устройств, которые ставятся на пути движения струй с целью гашения их кинетической энергии. При таком ударе образуются капельки различного размера. Чем с большей скоростью поток пароводяной смеси входит в барабан, тем мельче образующиеся при ударе его о щиток капли. Поток же пара наиболее легко уносятся именно мелкие капли. Ввиду этого при проектировании и сооружении внутрибарабанных устройств процессы дробления воды должны сводиться к минимуму или совсем исключаться.

Второй источник образования капель – разрыв оболочек паровых пузырей – приобретает существенное значение при вводе пароводяной смеси в барабан под уровень котловой воды. При разрушении паровых пузырей образуются мелкие капли, выбрасываемые в различных направлениях в паровой объем. Если начальная кинетическая энергия капли достаточно велика, то она будет выброшена на большую высоту. Может случиться, что она достигнет паротборных устройств и потоком пара будет увлечена в пароперегреватель. Чем больше высота парового пространства барабана, тем меньше вероятность выноса таких капель, которые в этом случае теряют свою энергию и падают обратно.

Избирательным унос называют тогда, когда како-либо вещество или группа веществ переходит в пар преимущественно перед другими, т. е. в большем количестве.

Избирательный унос (обуславливаемый растворимостью веществ в паре) становится заметным при давлении 7,0 МПа и более. Он объясняется тем, что отдельные вещества, содержащиеся в котловой воде, обладают способностью растворяться в паре высоких параметров. Среди таких веществ выделяется кремниевая кислота H_2SiO_3 , растворимость которой в паре, начиная с 7,0 МПа, быстро возрастает.

Кроме кремниевой кислоты, склонность к избирательному уносу при больших давлениях обнаруживают и другие соединения ($NaCl$, Na_2SO_4).

Наибольшей растворимостью в паре обладает кремниевая кислота, наименьшей – сульфат натрия. Растворимость веществ в паре увеличивается с ростом давления. Таким образом, для котельных агрегатов СВД избирательный унос становится основным источником загрязнения насыщенного пара.

2.8.2 Факторы, влияющие на качество пара котельных агрегатов с естественной циркуляцией

2.8.2.1 Конструктивные особенности котельного агрегата

Качество насыщенного пара зависит от многих факторов и в том числе от конструктивных особенностей котельного агрегата: высоты и объема парового пространства барабана, способа ввода пароводяной смеси в бара-

бан, способа отбора пара из барабана (рисунок 30), наличия и эффективности внутрибарабанных устройств и др.

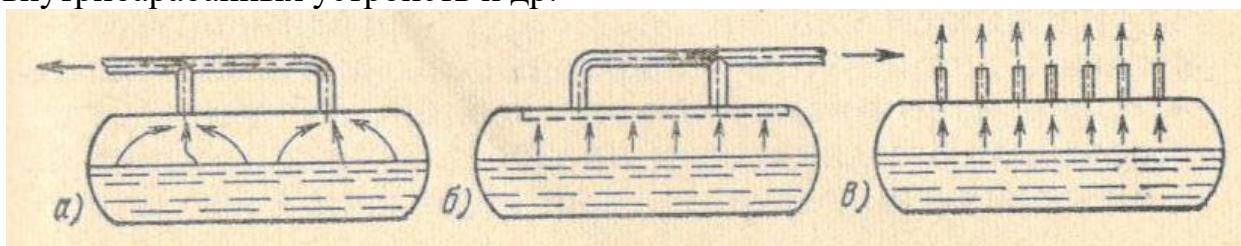


Рисунок 30 – Способы отвода пара из барабана котельного агрегата

а – сосредоточенный; б, в – равномерный.

Важнейшими факторами, определяемыми конструкцией котельного агрегата, являются удельные нагрузки парового объема барабана и зеркала испарения.

Уменьшение времени пребывания пара в паровом объеме барабана с увеличением удельной нагрузки означает повышение скорости пара в паровом объеме.

Паровой объем барабана может быть нагружен неравномерно. В этом случае паронапряжение отдельных его участков может значительно превышать усредненное значение удельной нагрузки. Такие участки и служат источником загрязнения пара. Местная высокая нагрузка парового объема возникает по разным причинам. Наиболее часто к этому ведет неравномерный отбор пара из барабана или сосредоточенный подвод в него пароводяной смеси. Нарушение работы внутрибарабанных устройств или нерациональность их схемы также создают местную перегрузку парового объема.

При вводе пароводяной смеси в барабан под уровень котловой воды пузырьки пара пронизывают всю толщину котловой воды и выходят в паровой объем через зеркало испарения. В связи с этим приобретает важное значение паронапряжение зеркала испарения.

При вводе пароводяной смеси под уровень унос влаги паром в основном определяется паронапряжением зеркала испарения действительной высотой парового объема (с учетом набухания). Поэтому для уменьшения влажности пара необходимо либо уменьшить паронапряжение зеркала испарения либо увеличить высоту парового объема (рисунок 32).

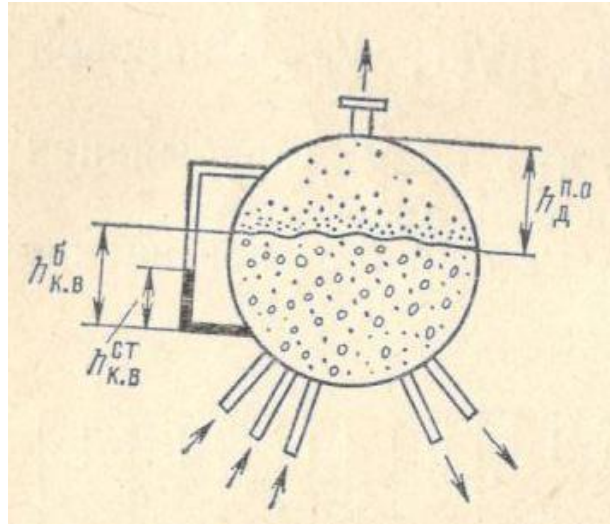


Рисунок 31 – Схема набухания котловой воды

Пузырьки пара движутся через слой котловой воды толщиной $h_{к.в}$, м, с некоторой скоростью $v_{п}$, м/с. Это значит, что они находятся в толще воды какое-то время, равное $\tau_{п} = h_{к.в} / v_{п}$.

Чем меньше скорость, тем дольше существуют пузырьки пара в котловой воде. Это ведет к насыщению воды паром, т. е. к образованию пароводяной смеси, плотность которой заметно меньше плотности воды. В результате объем воды и уровень ее в барабане увеличиваются, а паровой объем уменьшается. Такое явление называется **набуханием** котловой воды. Набухание приводит к тому, что уровень котловой воды в барабане $h_{к.в}^{Б}$ оказывается выше уровня $h_{к.в}^{СТ}$, отмечаемого по стеклу (рисунок 31).

Следствием этого является уменьшение высоты парового объема, что существенно влияет на качество пара.

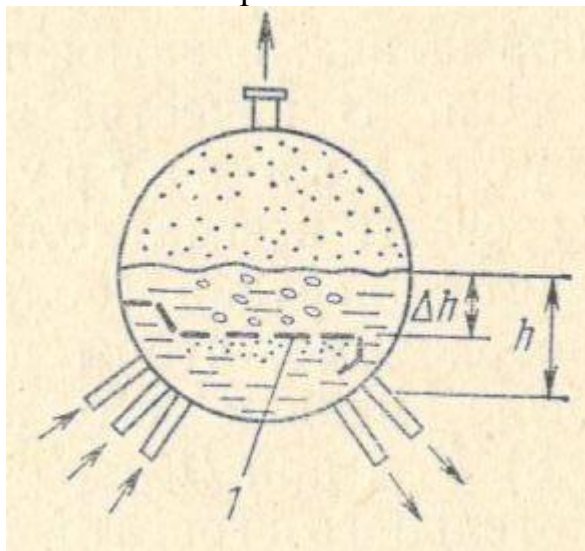


Рисунок 32 – Схема сепарации с водопогруженным дырчатым листом

1 – дырчатый лист.

Следовательно, подача пароводяной смеси под зеркало испарения сопряжена с явлением набухания уровня. В этих условиях особенно нежелателен сосредоточенный подвод пароводяной смеси, так как он создает высокие местные потоки пара через зеркало испарения, превращающиеся в очаги усиленного его увлажнения. На практике всегда принимают меры к тому, чтобы нагрузку зеркала испарения сделать равномерной. Один из наиболее распространенных приемов заключается в том, что в толще котловой воды на некотором расстоянии от ее уровня Δh и по всей площади зеркала испарения располагается дырчатый лист, т. е. металлический лист с отверстиями (рисунок 32). Он создает сопротивление проходу пара и тем самым выравнивает нагрузку зеркала испарения и уменьшает степень набухания котловой воды.

2.8.2.2 Эксплуатационный режим барабанного котельного агрегата

Работа котельного агрегата может сопровождаться изменением (пульсацией) нагрузки, уровня котловой воды и давления пара. В связи с этим важное значение приобретает характер зависимости качества пара от величины и динамики изменения этих параметров.

Загрязнение пара увеличивается с ростом нагрузки. Нагрузка, превышение которой вызывает недопустимое действующими нормативами загрязнение пара, называется *критической*. В качестве эксплуатационной принимается допустимая нагрузка $D_d = (0,7 - 0,7) D_{кр}$. Котельные агрегаты всегда должны работать в докритической области нагрузки. Для этого необходимо, чтобы проектная производительность $D_{пр}$ была меньше его критической нагрузки. Значение критической нагрузки зависит от многих факторов. Она находится в обратной зависимости от концентрации котловой воды, в прямой зависимости от высоты парового пространства и эффективности сепарационных устройств. Следовательно, она не является для данного котельного агрегата постоянной величиной и может быть рядом мероприятий изменена в сторону увеличения. Критическая нагрузка не поддается расчету и может быть установлена только путем проведения специальных теплотехнических испытаний.

Для получения нормального качества пара, кроме нагрузки, важным является и характер ее изменения. Резкое увеличение нагрузки может вызвать падение давления пара в барабане и вскипание котловой воды. Последнее сопровождается набуханием ее и уменьшением парового объема, что обуславливает увлажнение пара. Вот почему резкопеременная пиковая нагрузка является нежелательной.

В процессе эксплуатации фактическая нагрузка котельного агрегата может как возрастать, так и убывать. Однако при установившемся режиме работы количество вырабатываемого котельным агрегатом пара примерно соответствует количеству тепла вводимого в топку. Нарушение этого соответствия вызывает изменение давления пара в барабане. Подобные

условия возникают при пиковой нагрузке котельного агрегата, вызываемой резкопеременным расходом пара потребителями. При нагрузке в размере 25 % номинальной скорость падения давления пара в барабане составляет 0,012 МПа/с для давления 11 МПа и примерно 0,007 МПа/с для 3,5 МПа, т. е., котельные агрегаты высокого давления более чувствительны к резкому изменению нагрузки. При таком повышении нагрузки уровень котловой воды увеличивается со скоростью 30 – 50 для высокого и 40 м/с для среднего давлений.

2.9 Образование солевых отложений в турбинах и пароперегревателях и их удаление

2.9.1 Паровые турбины

В паровых турбинах соли откладываются преимущественно на лопатках. Непосредственным следствием этого является увеличение шероховатости поверхности лопаток, искажение профилей каналов и перераспределение тепловых перепадов из-за неравномерного отложения солей по разным ступеням. Все это обуславливает снижение экономичности работы турбины. При значительном заносе лопаточного аппарата живое сечение для прохода пара уменьшается, и мощность турбины снижается. При отложении в ЦВД турбины мощностью 300 МВт СКД всего 0,6 – 0,8 кг различных соединений расход условного топлива увеличивается на 5 г/(кВт·ч).

Образование в турбинах отложений есть результат сложных процессов, протекающих в них при проходе пара. Поступающий в турбину перегретый пар всегда содержит некоторое количество нелетучих веществ, присутствующих в виде сухих твёрдых частичек и в растворённом состоянии. Для давлений более 7,0 МПа большая часть веществ находится в перегретом паре в состоянии раствора. В турбине происходит непрерывное изменение параметров пара, т. е. уменьшение его давления и температуры. Вместе с этим изменяется и растворимость содержащихся в паре веществ. Если при входе в турбину пар был насыщен по отношению к какому-либо веществу, то оно начнет выпадать из пересыщенного парового раствора уже на первых ступенях турбины.

Если же концентрация данного вещества в паре меньше насыщающей, выпадение начнется в области тех ступеней, где образуется пересыщенный паровой раствор. Присутствующие в паре сухие вещества (или частички в виде густого раствора) могут также выделяться на лопатках, приликая к их поверхности при ударе. Наиболее интенсивное отложение растворимых соединений наблюдается при относительно высоких температуре и давлении пара. Нерастворимые в воде кремнекислые отложения возникают преимущественно в зоне слабо перегретого или насыщенного пара.

Возникающие в турбинах отложения могут состоять из растворимых и нерастворимых в воде соединений. К первым относятся соединения натрия (Na_2SO_4 , NaCl , Na_2SiO_3 , NaOH), ко вторым – окислы железа, алюминия и кремниевая кислота. Состав отложений в турбинах высокого и среднего давлений резко отличен. В турбинах среднего давления отложения на 70 – 80% состоят из сульфата, хлорида и карбоната натрия, в то время как основная часть отложений в турбинах высокого давления состоит из кремнекислых соединений. В турбинах СКД в ЦСВД и ЦВД выпадают CuO , Fe_2O_3 , SiO_2 в ЦСД и ЦНД основное количество отложений приходится на Na_2SiO_3 и SiO_2 , хотя здесь встречается и Fe_2O_3 .

Основным способом борьбы с отложениями в турбинах является предупреждение их образования путём обеспечения высокого качества пара. Если отложения все же возникают, удаление их производится промывкой проточной части турбины влажным паром. Растворимые в воде отложения в этом случае смываются и удаляются в конденсатор. Подобное частичное смывание растворимых отложений наблюдается при пуске и остановке турбины. Специальные промывки турбин влажным паром, особенно турбин СКД, являются ответственными операциями. Они проводятся по специальной программе с тщательным контролем определяющих режим параметров, требуют подготовки и отработки всех операций. Труднорастворимые в воде отложения удаляются путем впрыска в пар реагентов-растворителей, в качестве которых используются едкий натр, аммиак, гидразин и комплексоны (ЭДТА). Турбины могут промываться при частичной (20 – 25%) разгрузке, в режиме расхолаживания и под нагрузкой. В последнем случае операция промывки является весьма ответственной и сложной.

2.9.2 Пароперегреватели

Насыщенный пар по выходе из барабана поступает в пароперегреватель. Здесь капельки котловой воды, присутствующие в нем, испаряются, а растворенные в них вещества в какой-то части остаются в пароперегревателе или уносятся в турбину.

Капля котловой воды будет полностью выпарена, если температура перегрева пара будет больше температуры кипения насыщенного раствора. Если температура насыщенного раствора будет больше температуры перегрева пара, выпаривание капли невозможно и она может уйти из пароперегревателя в виде густотого раствора. Численное значение температуры насыщенного раствора зависит от состава веществ, присутствующих в капле. Преобладание веществ, имеющих положительный коэффициент растворимости (NaOH , NaCl , KCl), может привести к условию, что температура насыщенного раствора будет больше температуры перегрева пара. Если условие обратное – то это говорит о преобладании в капле

веществ с отрицательным коэффициентом растворимости (Na_2SO_4 , Na_3PO_3 и др.).

Часть веществ, содержащихся в капельках котловой воды, будет растворяться в паре. Поскольку растворимость веществ в паре увеличивается с ростом давлений, то в пароперегревателях котельных агрегатов высокого и сверхвысокого давлений значительная доля солей, увлеченных паром, перейдет в раствор и пройдет перегреватель «транзитом». При значительной влажности пара отложения в пароперегревателях котельных агрегатов высокого и сверхвысокого давлений могут возникнуть. Однако в последующем эти отложения постепенно перейдут в пар. В котельных агрегатах среднего давления почти все нелетучие примеси насыщенного пара (если количество их превышает норму) осаждаются в пароперегретеле. При этом в первую очередь будут осаждаться такие вещества, как Na_2SO_4 , Na_2SO_3 , Na_3PO_4 , Na_2SiO_3 .

Перегреватели работающих барабанных котельных агрегатов в той или иной степени заносятся солевыми отложениями, которые, как правило, состоят из хорошо растворимых в воде соединений натрия. Чтобы устранить накопление отложений, пароперегреватели промываются. Промывка может быть общей или индивидуальной. При общей промывке воду подают в коллектор перегретого пара, из которого она по всем змеевикам поступает в барабан. Если коллектор насыщенного пара имеет дренажную линию, то промывочную воду сбрасывают в дренаж. Перед промывкой перегреватель заполняется водой и оставляется в таком состоянии на 1 – 2 ч.

К достоинству общей промывки относится то, что она легко осуществима, требует небольшой затраты времени и труда. Однако она не гарантирует удаления отложений со всех змеевиков пароперегревателя. Индивидуальная промывка, при которой промывается каждый змеевик в отдельности, лишена этих недостатков, но требует затраты значительно большего времени. Поэтому общая промывка обычно производится в кратковременные остановки котельного агрегата на профилактический ремонт, а индивидуальная – в период капитального ремонта.

Это относится главным образом к котельным агрегатам давлением до 4,0 МПа. Промывка перегревателей современных барабанных котельных агрегатов давлением до 15,5 МПа представляет собой сложную операцию, выполнить которую весьма затруднительно. Поэтому на этих котельных агрегатах чистота перегревателей обеспечивается хорошей внутрибарабанной сепарацией, т. е. высоким качеством насыщенного пара.

2.10 Сепарационные устройства

В современных барабанных котельных агрегатах внутри барабанов имеются различные устройства, имеющие целью обеспечение чистоты насыщенного пара; они предназначены для гашения кинетической энергии входящих в барабан потоков пароводяной смеси, отделе пара от воды (грубая сепарация) и осушения пара, т. удаление из него капельной влаги (тонкая сепарация).

Сепарация (отделение, выделение) влаги из пото пара основана на разности плотности насыщенного пара и воды, чем она больше, тем лучше и легче отделяется влага. С повышением давления пара разность плотностей уменьшается, и тем самым усложняются условия сепарации. Использование этой разности осуществляют на практике рядом приемов. Основной из них заключается в равномерном распределении потока пара в свободном паровом объеме барабана таким образом, чтобы скорости его движения были наименьшими из возможных. Это создает благоприятные условия для осаждения капелек влаги на зеркало испарения (осадительная сепарация). Другой прием состоит в том, что на пути парового потока устанавливают отражательные металлические пластины. При ударе капельки влаги смачивают пластины и прилипают к их поверхности: отражаясь от пластин, пар меняет направление движения, вследствие чего центробежной силой оставшиеся капельки влаги выбрасываются из его потока.

Гашение кинетической энергии пароводяных потоков входящих в барабан с высокими скоростями, и отделение основной массы воды от пара являются первым этапом сепарации. Эти два процесса обычно совмещают. При поступлении смеси в паровой объем барабана гашение энергии струи производится при помощи отбойных щитков, щелевых или глухих перегородок.

При вводе пароводяной смеси в водяной объем барабана гашение энергии струи происходит в слое котловой воды. Однако при этом должно быть обеспечено равномерное распределение выделяющегося пара по зеркалу испарения, чтобы исключить высокоскоростные местные потоки пара по наиболее короткому пути. Такое распределение достигается применением водопогруженных дырчатых листов (рисунок 32). Дырчатый лист создает определенное сопротивление движению пара, который и распределяется вследствие этого по всей площади листа. Кроме щитков, для этой же цели широко используются циклоны, которые особенно эффективны при концентрированной котловой воде, склонной к вспениванию. Внутрибарабанный циклон (рисунок 33) представляет собой полый цилиндр. Пароводяная смесь специальным коробом подводится в него по касательной. Возникающим от этого вращением вода отбрасывается к стенке и стекает вниз, а пар выходит вверх по образующей в центре полости. Таким образом, происходит безударное гашение кинетической энергии пароводяной струи, что исключает дробление воды. Циклоны, однако, обладают повышенным

гидравлическим сопротивлением и при недостаточном циркуляционном напоре непремлемы.

Основным элементом всех современных сепарационных схем является большой свободный паровой объем, обеспечивающий осадительную сепарацию. Применяемые разнообразные схемы внутрибарабанных сепарационных устройств позволяют получить удовлетворительное качество пара лишь при правильной и тщательной сборке и пригонке к месту всех элементов схемы. Основное требование к монтажу и сборке сепарационных устройств состоит в том, что высокоскоростные потоки котловой и питательной воды, пароводяной смеси или влажного пара не должны прорываться в поток осушенного пара, минуя сепарационные устройства и сепарационно-активный объем.

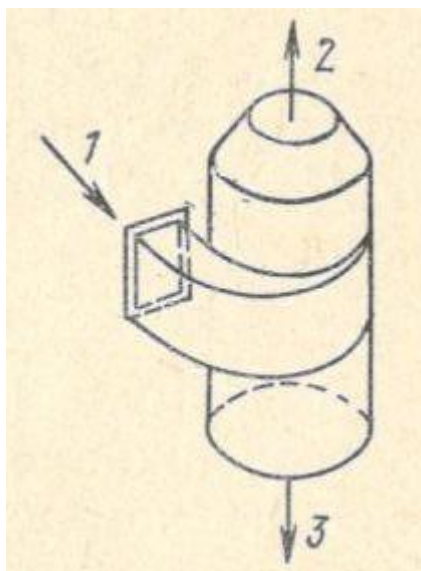


Рисунок 33 – Внутрибарабанный циклон

1 – вход пароводяной смеси; 2 – выход пара; 3 – выход воды.

Сепарационные устройства не могут удалить вещества, растворенные в паре. Поэтому обычные схемы сепарационных устройств дополняются промывкой пара питательной водой или конденсатом. Она основана на том, что насыщенный пар контактирует с более чистой водой, чем котловая, в результате чего значительная часть растворенных в паре веществ переходит в промывочную воду. Промывка пара осуществляется путем барботажа через слой промывочной воды, после чего он поступает на сепарационные устройства для удаления влаги.

2.11 Продувка котельных агрегатов с естественной циркуляцией

Продувкой называют вывод из котельного агрегата части котловой воды и замену ее питательной. Это делается для того, чтобы предотвратить чрезмерное увеличение концентрации веществ в котловой воде. Различают продувку непрерывную и периодическую. *Непрерывная* продувка предназначена для поддержания определенной концентрации котловой воды, *периодическая* продувка – для вывода из котельного агрегата шлама.

При помощи продувки устанавливается материальный баланс солей в котельном агрегате, т. е. равенство их прихода и убыли.

Непрерывная продувка котельного агрегата может производиться по многим схемам. Одна из них, наиболее часто встречающаяся, представлена на рисунке 34. Важными элементами схем являются расходомер и регулировочный узел. На представленной схеме регулирование осуществляется игольчатым вентиляем, а контроль значения продувки – по расходомеру.

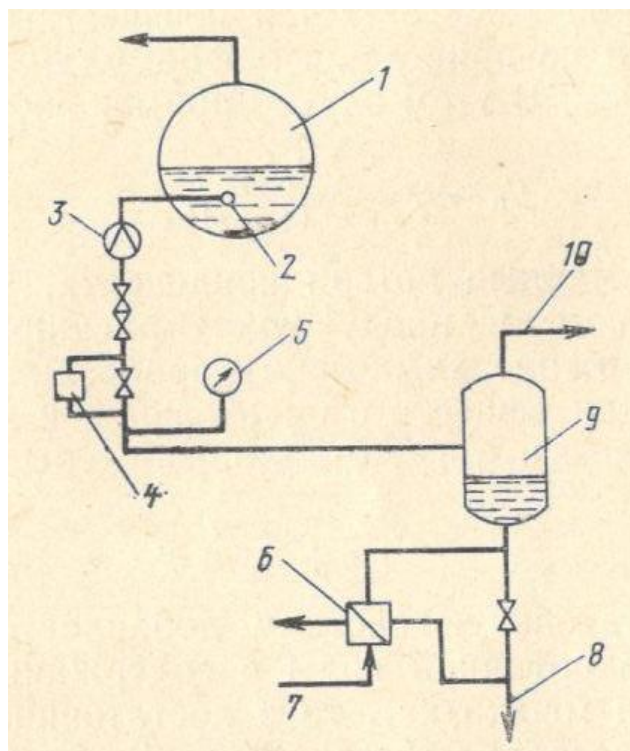


Рисунок 34 – Принципиальная схема непрерывной продувки

1 – барабан; 2 – водозаборное устройство; 3 – расходомер; 4 – игольчатый вентиль; 5 – манометр; 6 – теплообменник; 7 – нагреваемая вода; 8 – дренаж; 9 – расширитель; 10 – выпар.

В расширителе поддерживается давление, значительно меньшее, чем в котельном агрегате.

Пар из расширителя большей частью подается в деаэратор, хотя может использоваться и на другие нужды. Сепарированная вода направляется в

теплообменник, в котором она отдает тепло химически обработанной или исходной воде, поступающей на водоподготовку. Продувочная вода непрерывной продувки может быть использована на восполнение потерь в теплофикационной системе на питание испарителей и др.

Наряду с непрерывной продувкой производится также и периодическая. Она предназначена для удаления из котельного агрегата шлама, который обычно скапливается в нижних точках – нижних барабанах, грязевиках, коллекторах экранов. С этих элементов и делается отбор воды для периодической продувки. Режим ее зависит от степени зашламленности котловой воды.

2.12 Вывод загрязнений из цикла паросиловой установки

В питательную систему котельных агрегатов непрерывно поступают различные вещества, источником которых могут быть: присосы охлаждающей воды в конденсаторах турбин, добавляемая вода для восполнения порь в цикле, процессы коррозии. Для устранения возможности накопления нелетучих веществ в цикле теплосиловой установки, которое приводит обычно к нарушению ее нормальной работы, необходимо систематически и в соответствующем размере выводить эти загрязнения из цикла. Продувка барабанных котельных агрегатов удовлетворительно решает эту задачу. Однако она может быть использована только для докритических параметров пара в случаях, когда удаляемые примеси могут концентрироваться в зоне, откуда производится продувка, т.е. когда коэффициент распределения таких примесей весьма мал. Это делает продувку эффективной.

Для прямоточных бесепараторных котельных агрегатов докритических параметров и СКД продувка теряет свое значение и основным способом выведения ионных и суспендированных загрязнений является очистка части или всего количества питательной воды на специальных обессоливающих установках. Ввиду этого современные мощные энергоблоки оборудуются блочными обессоливающими установками (БОУ).

2.13 Ступенчатое испарение

Сущность идеи ступенчатого испарения основывается на следующих положениях. Качество пара определяется концентрацией веществ в котловой воде, с которой пар находится в контакте перед выходом его в паровой объем котельного агрегата. Так как общий коэффициент распределения для данного котельного агрегата при установившемся режиме его работы является примерно постоянным, то единственная возможность уменьшить концентрацию какого-либо вещества в паре, заключается в снижении концентрации веществ в котловой воде. Однако это снижение можно произвести различными способами.

Минимальное значение концентрации веществ в паре может быть достигнуто либо уменьшением концентрации веществ в питательной воде, либо увеличением продувки. Снижение производительности по питательной воде недопустимо, так как это означает уменьшение нагрузки котельного агрегата. Уменьшения концентрации веществ в паре, возможно достигнуть двумя способами: обессоливанием добавляемой воды или уменьшением добавки химически обработанной воды в питательную систему.

Обессоливание пока можно использовать далеко не во всех случаях. Уменьшение добавки на действующей станции сопряжено с увеличением конденсатной или дистиллятной составляющей питательной воды, что во многих случаях оказывается невозможным. Поэтому снижения концентрации веществ в паре на практике большей частью прибегают к увеличению продувки котельного агрегата. Однако обычных котельных агрегатов, не оборудованных ступенчатым испарением, увеличение продувки имеет свой предел ($\leq 5\%$), связано с большими потерями тепла и не всегда возможно по условиям эксплуатации.

Снижение концентрации котловой воды за счет больших значений производительности продувочной воды пока оказывается возможным и приемлемым, если испарение вод в котельном агрегате организовать по ступенчатой схеме. На рисунке 35 представлены схемы циркуляции котловой воды обычного котельного агрегата и оборудованного двухступенчатым испарением. Последний имеет два самостоятельных контура циркуляции, водяные объемы которых сообщаются между собой только через отверстие 1, сделанное в разделительной внутрибарабанной перегородке 2.

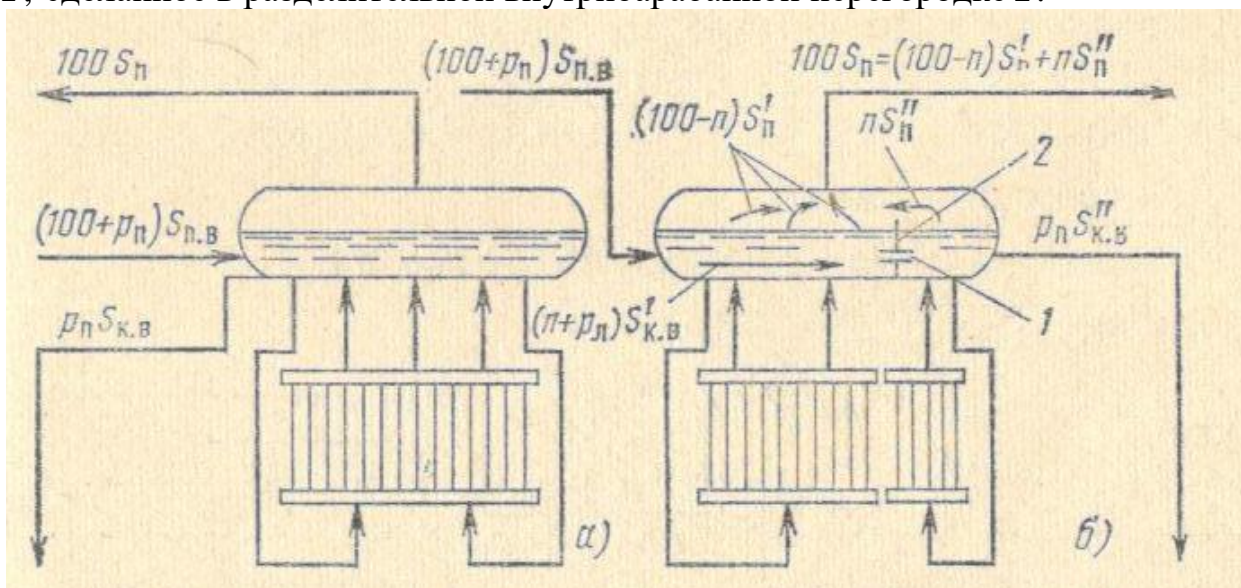


Рисунок 35 – Схема циркуляции котловой воды в котельных агрегатах

а – без ступенчатого испарения; б – с двухступенчатым испарением.

Питательная вода поступает в большой отсек, называемый чистым или первой ступенью испарения. Котловая вода чистого отсека служит

питательной для второй ступени испарения, называемой солевым отсеком. Продувка осуществляется только из солевых отсеков.

Таким образом, ступенчатое испарение основано на создании различных солевых концентраций котловой воды в циркуляционных контурах котельного агрегата, образующих чистый и солевые отсеки. Важной особенностью ступенчатого испарения является то, что большая часть пара получается из котловой воды чистого отсека, обладающей значительно меньшим содержанием солей, чем продувочная вода. Отсюда следует, что качество котловой воды чистого отсека является основным показателем надежности водного режима котельного агрегата.

Вторая ступень испарения (паропроизводительность которой выражается обычно в процентах от производительности пара) выдает пар такого же качества, как и котельный агрегат без ступенчатого испарения при тех же значениях плотности пара и концентрации питательной воды. Поскольку, однако, количество пара, вырабатываемого первой ступенью, в несколько раз больше количества пара, получаемого с солевого отсека, то качество пара котельного агрегата со ступенчатым испарением также выше, чем у одноступенчатого при одинаковых других условиях. Это свойство ступенчатого испарения является весьма ценным в условиях ухудшенного качества питательной воды.

Конструктивно отсеки располагаются как внутри барабана, так и вне его. Внутри барабана солевые отсеки чаще всего находятся у его торцов (рисунок 36).

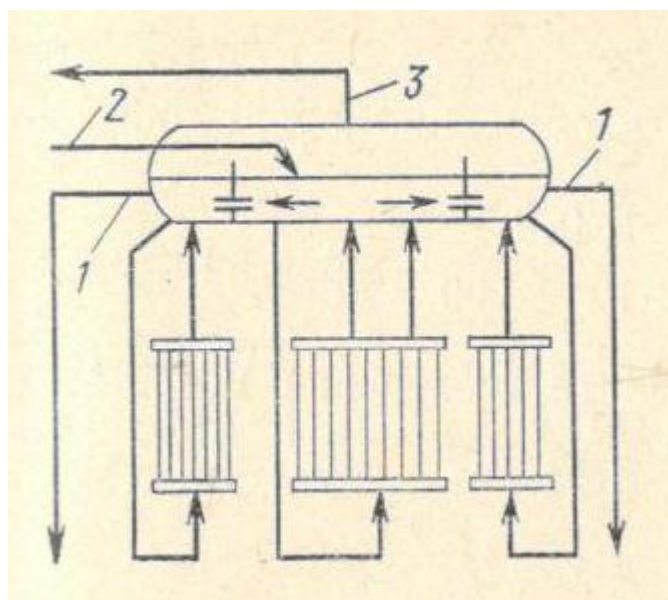


Рисунок 36 – Схема двустороннего расположения солевых отсеков в барабане котельного агрегата

1 – продувка; 2 – питательная вода; 3 – пар.

Недостатком такого расположения является двусторонняя продувка, усложняющая химический контроль водного режима. Наличие переброса

котловой воды солевых отсеков в чистые через перегородки является еще одним недостатком этой схемы. Значительное уменьшение переброса достигается в схемах с солевыми отсеками, вынесенными из барабана.

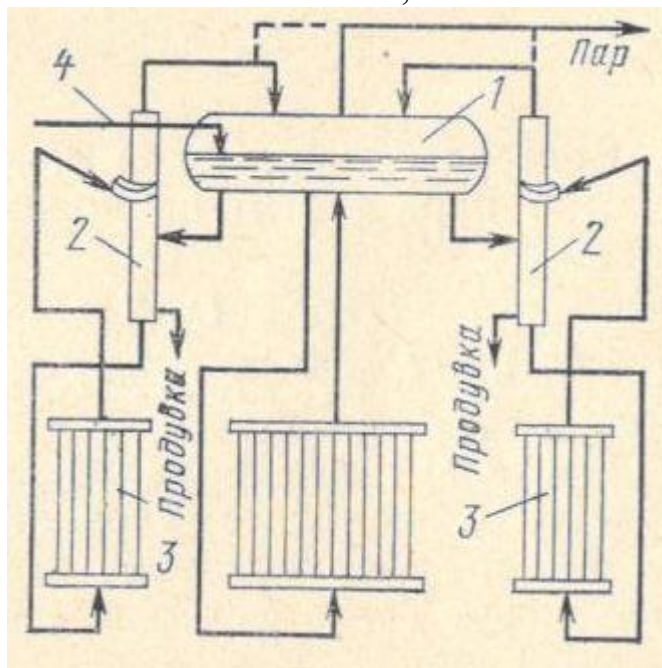


Рисунок 37 – Схема двухступенчатого испарения с выносными циклонами

1 – барабан; 2 – циклон; 3 – экранная поверхность котельного агрегата; 4 – питательная вода.

Рядом с барабаном 1 (рисунок 37) устанавливаются циклоны, к которым подключаются экранные поверхности котельного агрегата (обычно часть боковых экранов) 3. Питательная вода 4 поступает в барабан (чистый отсек), из которого и осуществляется питание циклонов. Циклоны вместе с подключенными к ним экранами образуют самостоятельные контуры циркуляции. Пар из циклона направляется в барабан или непосредственно в пароперегреватель, если качество пара достаточно высокое. Продувка осуществляется из циклонов. Схема с выносными циклонами позволяет частично разгрузить паровой объем барабана, что способствует улучшению качества пара. В схемах трехступенчатого испарения две ступени располагаются в барабане, третья – образуется выносными циклонами.

3 Задания для самостоятельной работы студентов заочной формы обучения

3.1 Методические указания по выполнению самостоятельной работы

Самостоятельная работа № 1 «Водные растворы и их свойства. Растворимость, водородный показатель»

студент должен знать:

- основные химические процессы осветления, умягчения, пассивации и подкисления питательной воды, химические реагенты, реактивы, применяемые при химводоочистке;

Способы выражения концентрации растворов. Растворимость твердых веществ в воде. Растворимость газов в воде. Водородный показатель.

Студентам необходимо подготовить опорный конспект на предложенные темы.

Самостоятельная работа № 2 «Способы приготовления и дозирования реагентов»

студент должен знать:

- принцип работы обслуживаемого оборудования: водоподготовительных установок, фильтров различных систем, насосов, дозаторов, деаэраторов, отстойников и других аппаратов, применяемых в химической очистке воды;

- схему расположения водо- и паропроводов, кранов и вентиляей.

Дозирование растворов реагентов. Схема дозирования раствора реагента краном. Схемы сифонного и шайбового дозатора. Схемы дозатора легкорастворимых реагентов для дозирования в открытый бак и в напорный трубопровод.

Студентам необходимо подготовить опорный конспект на предложенные темы.

Самостоятельная работа № 3 «Схемы ионообменных водоподготовительных установок для парогенераторов и тепловых сетей. Типы ионообменных фильтров»

студент должен знать:

- принцип работы обслуживаемого оборудования: водоподготовительных установок, фильтров различных систем, насосов, дозаторов, деаэраторов, отстойников и других аппаратов, применяемых в химической очистки воды;

- основные химические процессы осветления, умягчения, пассивации и подкисления питательной воды, химические реагенты, реактивы, применяемые при химводоочистке;

- схему расположения водо- и паропроводов, кранов и вентиляей.

Обработка воды методом катионирования. Обработка воды методом анионирования. Характеристики и свойства ионообменных веществ. Устройство ионообменных фильтров. Эксплуатация ионообменных фильтров. Обессоливание воды.

Студентам необходимо подготовить опорный конспект на предложенные темы.

Самостоятельная работа № 4 «Сущность и формы проявления коррозии»

студент должен знать:

- принцип работы обслуживаемого оборудования: водоподготовительных установок, фильтров различных систем, насосов, дозаторов, деаэраторов, отстойников и других аппаратов, применяемых в химической очистки воды;

- основные химические процессы осветления, умягчения, пассивации и подкисления питательной воды, химические реагенты, реактивы, применяемые при химводоочистке;

Сущность и форма проявления коррозии металлов. Основные внешние факторы коррозии. Коррозия паровых котельных агрегатов.

Студентам необходимо подготовить опорный конспект на предложенные темы.

Самостоятельная работа № 5 «Особенности образования отложений в различных видах оборудования»

студент должен знать:

- принцип работы обслуживаемого оборудования: водоподготовительных установок, фильтров различных систем, насосов, дозаторов, деаэраторов, отстойников и других аппаратов, применяемых в химической очистки воды;
- основные химические процессы осветления, умягчения, пассивации и подкисления питательной воды, химические реагенты, реактивы, применяемые при химводоочистке;

Виды отложений, их состав и влияние на работу оборудования. Предотвращение образования отложений. Удаление отложений различными способами.

Студентам необходимо подготовить опорный конспект на предложенные темы.

Самостоятельная работа № 6 «Контроль водно-химического режима теплосиловых установок»

студент должен знать:

- принцип работы обслуживаемого оборудования: водоподготовительных установок, фильтров различных систем, насосов, дозаторов, деаэраторов, отстойников и других аппаратов, применяемых в химической очистки воды;
- основные химические процессы осветления, умягчения, пассивации и подкисления питательной воды, химические реагенты, реактивы, применяемые при химводоочистке;

Водно-химический режим теплосилового установок. Общие требования к химическому контролю. Отбор проб воды и пара. Теплхимические испытания паровых котельных агрегатов. Нормы качества питательной, котловой воды, пара и конденсата.

Студентам необходимо подготовить опорный конспект на предложенные темы.

Самостоятельная работа № 7 «Принципы компоновки аппаратуры водоподготовительной установки»

студент должен знать:

- принцип работы обслуживаемого оборудования: водоподготовительных установок, фильтров различных систем, насосов, дозаторов, деаэраторов, отстойников и других аппаратов, применяемых в химической очистке воды;

- основные химические процессы осветления, умягчения, пассивации и подкисления питательной воды, химические реагенты, реактивы, применяемые при химводоочистке;

Схемы и оборудования обессоливающих установок. Выбор схемы водоподготовки в зависимости от качества исходной воды и типа парогенератора. Определение производительности водоподготовительной установки. Принцип расчета осветлительных и ионитных фильтров. Основы расчета декарбонизатора

Студентам необходимо подготовить опорный конспект на предложенные темы.

3.2 Задания для выполнения домашней контрольной работы студентов заочной формы обучения

3.2.1 Указания к выполнению домашней контрольной работы

Контрольная работа выполняется по вариантам. Студент выполняет вариант контрольного задания, соответствующей последней цифре своей зачетной книжки.

Работа, выполненная по другому варианту, не будет приниматься к рассмотрению.

Домашняя контрольная работа выполняется в печатном виде. Каждый вопрос должен начинаться с нового листа. Ответы на вопросы должны быть полными, иметь поясняющие рисунки (схемы), список использованных источников. Отвечать на вопросы домашней контрольной работы следует после изучения соответствующих разделов и тем. Оформляется контрольная работа согласно «Общим требованиям к правилам оформления текстовых учебных документов для студентов БЦБК ФГБОУ ВО "БРГУ"».

Студенты, получившие неудовлетворительную оценку за выполненную работу, выполняют работу другого варианта по указанию преподавателя.

Вариант 1

1. Вещества, загрязняющие природные воды. Их классификация
2. Удаление загрязнений в осветлителе методом осаждения
3. Термическая деаэрация
4. Сущность и формы проявления коррозии
5. Обезмасливание пара и конденсата

Вариант 2

1. Характеристика природных вод
2. Обезжелезивание конденсата
3. Продувка котельного агрегата с естественной циркуляцией
4. Состав и свойства отложений в котельных агрегатах
5. Факторы, влияющие на качество пара

Вариант 3

1. Основные показатели качества воды
2. Эксплуатация осветлителей
3. Очистка пара в сепарационных устройствах
4. Отбор проб воды и пара
5. Предотвращение образования отложений в котельных агрегатах

Вариант 4

1. Умягчение воды в осветлителях
2. Очистка воды по методу анионного обмена
3. Эксплуатация зернистых осветлительных фильтров
4. Коррозия в котлоагрегате
5. Обессоливание воды

Вариант 5

1. Очистка воды от коллоидальных веществ
2. Влияние эксплуатационных факторов котлоагрегата
3. Очистка воды по методу катионного обмена (H – катионирование)
4. Теплохимические испытания котельного агрегата
5. Осветление воды на зернистых осветлительных фильтрах

Вариант 6

1. Химическое обескислороживание воды
2. Эксплуатация ионных фильтров
3. Очистка воды по методу катионного обмена (NH₄ – катионирование)
4. Ступенчатое испарение и его влияние на работу котлоагрегата
5. Удаление образовавшихся отложений в котельных агрегатах

Вариант 7

1. Устройство ионообменных фильтров
2. Удаление из воды коллоидных загрязнений
3. Очистка воды по методу катионного обмена (Na – катионирование)
4. Осветление воды на намывных фильтрах
5. Причины загрязнения пара и конденсата

Вариант 8

1. Анионирование воды
2. Магнитная обработка воды, конструкции аппаратов
3. Виды и места проявления коррозии в котлах
4. Характеристики и свойства ионообменных веществ
5. Современные методы обеззараживания воды

Вариант 9

1. Выбор и схемы водоподготовки в зависимости от качества исходной воды и типа парогенератора
2. Устройство и эксплуатация различных видов фильтров
3. Состав и свойства отложений в котельных агрегатах
4. Унос веществ насыщенным паром

Вариант 10

1. Процессы умягчения воды и расход реагентов
2. Нормы качества питательной, котловой воды, пара и конденсата
3. Способы удаления коррозионно-активных газов, устройство оборудования
4. Виды отложений и влияние их на работу оборудования
5. Сепарационные устройства

9.3 Критерии оценок

оценка «5» - если домашняя контрольная работа студента выполнена в полном объеме, в соответствии с требованиями. Ответы на вопросы полностью раскрыты, имеют поясняющие рисунки (схемы) и список использованных источников.

оценка «4» - если домашняя контрольная работа студента выполнена в полном объеме, в соответствии с требованиями, но имеются замечания по выполнению контрольной работы.

оценка «3» - если домашняя контрольная работа студента выполнена в не полном объеме и ответы на вопросы даны кратко.

Глоссарий

Адгезия – сцепление поверхностей разнородных твёрдых и (или) жидких тел.

Анионирование – процесс обмена анионов между растворенными в воде электролитами и твердым зернистым веществом, погруженным в эту воду и называемым анионитом. В качестве обменного чаще всего используется анион OH^- , хотя могут использоваться и другие анионы, например Cl^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- .

Аниониты – искусственно приготовленные материалы.

Байпас – это обводная труба с запорной арматурой, позволяющая перенаправлять поток жидкости в обход того или иного прибора.

Барботаж – это процесс пропускания газа или пара через слой жидкости. Газ продавливается через слой жидкости с помощью труб с мелкими отверстиями (3–6 мм), называемых барботёрами, ситчатых или колпачковых тарелок абсорберов и ректификационных колонн.

Бикарбонатная щелочность – если в воде присутствует HCO_3^- .

Временная жесткость – карбонатная жесткость, которая снижается или устраняется полностью путем кипячения воды.

Гидратная щелочность – если в воде присутствует ион OH^-

Градирня – (сгущать соляной раствор; первоначально градирни служили для добычи соли выпариванием) – устройство для охлаждения большого количества воды направленным потоком атмосферного воздуха. Иногда градирни называют также охладительными башнями.

ГРЭС – государственная районная электростанция (бывшая КЭС – конденсационная электростанция) – тепловая электростанция, производящая только электрическую энергию

Грязеемкость фильтра называется количество задержанных фильтром за фильтроцикл загрязнений, отнесенное к 1 м^3 фильтрующего материала и выраженное в кг.

Декарбонизатор – предназначен для удаления свободной, растворённой в воде углекислоты, избыток, которой вызывает коррозию металла и разрушение бетона.

Деаэратор – аппарат для удаления из воды растворенных кислорода и диоксида углерода, вызывающих коррозию оборудования. Деаэратор устанавливают на ТЭС и АЭС для деаэрации питательной воды, подаваемой в парогенераторы, и подпиточной воды, подаваемой в тепловую сеть.

Деаэрация (дегазация) – процесс, имеющий целью удаление из нее растворенных агрессивных газов – кислорода и углекислоты.

Десорбция – (от лат. sorbeo – поглощаю), удаление адсорбированного вещества с поверхности адсорбента. Десорбция обратна адсорбции и происходит при уменьшении концентрации адсорбируемого вещества в среде, окружающей адсорбент, а также при повышении температуры.

Диссоциация в физической химии и биохимии — распад сложных химических соединений на составляющие компоненты и/или элементы.

Дроссельная диафрагма — это дросселирующее устройство, которое представляет собой диск с отверстием, вставляемый в трубу для местного увеличения гидравлического сопротивления потоку жидкости, пара или газа.

Железоокисные накипи, состоящие из соединений железа. В состав этого рода отложений могут входить ферросиликаты железа, фосфаты железа $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$, феррофосфат натрия NaFePO_4 и окиси железа Fe_2O_3 , Fe_3O_4 .

Жёлоб — длинное полукруглое или прямоугольное углубление.

Известкование применяется в тех случаях, когда необходимо снизить щелочность исходной воды.

Известковым молоком называется взвесь твердых не растворившихся в воде частичек извести $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в насыщенном известковом растворе.

Исходная вода — вода, забираемая из источника водоснабжения.

ИФНД — ионитные фильтры непрерывного действия

Карбонатная жесткость воды обусловлена содержанием в ней гидрокарбонатов кальция $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ и магния $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$.

Карбонатная щелочность — если в воде присутствует ион CO_3^{2-} .

Катионированием называется процесс обмена катионов между электролитами, растворенными в воде, и твердым нерастворимым веществом, погруженным в эту воду и называемым катионитом.

Коагуляцией называется процесс укрупнения (слипания, свертывания) коллоидных частиц, завершающийся выпадением вещества в осадок, удаляемый осаждением или фильтрованием.

Кремнесодержанием называется концентрация кремниевой кислоты H_2SiO_3 в пересчете на двуокись кремния SiO_2 , находящуюся в исходной воде.

Коагулянтами называются реагенты, способные при введении в воду вызывать коагуляцию природных коллоидов, называют

Магнетит — (устаревший синоним — магнитный железняк) $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$.

Медные накипи, содержащие значительную долю меди.

Минеральный остаток — величина, полученная путем суммирования всех найденных в воде анализом катионов, анионов и в том числе CO_3^{2-} , а также Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2 .

Накипь — достаточно плотные отложения, возникающие на поверхности нагрева или охлаждения и способные нарушать нормальную работу котельного агрегата или теплообменника.

Некарбонатная жесткость воды определяется по наличию в ней всех остальных (помимо гидрокарбонатов) солей кальция и магния — хлоридов CaCl_2 , MgCl_2 , сульфатов $\text{Ca}(\text{HSO}_3)_2$, MgSO_4 и др.

Обескислороживание — удаление из воды одного кислорода.

Обессоливание воды — процесс удаления из нее катионов и анионов растворенных в ней веществ.

Обменный катион – катион, который отдает катионит в раствор взамен поглощаемых катионов.

Общая жесткость – сумма концентраций катионов кальция $C(\text{Ca}^{2+})$ и магния $C(\text{Mg}^{2+})$ в воде.

Окисляемость воды характеризуется наличием в ней органических соединений.

ПАА (флокулянты полиакриламид) – отличные, и к тому же недорогие химические реагенты (флокулянты и коагулянты), которые успешно применяются для очистки питьевой воды и технологических сточных вод.

Пароводяная коррозия – разрушение металла в результате химического взаимодействия его с водяным паром.

Пароочиститель – аппарат, в котором производится обезмасливание пара.

Паропромыватель – аппарат, в котором производится глубокое обезмасливание пара.

Пассивация – это явление снижения скорости газовой коррозии при понижении парциального давления. Пассивация возникает из-за образования на поверхности металла (Cu, Ti, Zn, Cr, Al и т. д.) пленки. Перепассивация – это нарушение пассивного состояния.

Пептизация – процесс, противоположный коагуляции, т.е. переход твердого вещества (например, осадка) в коллоидное состояние, называется

Питательная вода – вода, поступающая в котельные агрегаты.

Постоянная жесткость – карбонатная жесткость, которая при нагревании и кипячении воды она не уменьшается.

Прозрачность характеризует концентрацию взвешенных в воде веществ. Её определяют в специальных стеклянных цилиндрах, в которых на дне нанесены крестообразные полосы толщиной в 1 мм на белом матовом фоне или может быть нанесен печатный шрифт. Прозрачность определяется высотой столба воды в сантиметрах, налитой в такой цилиндр.

Прокаленный остаток – сухой остаток, прокаленный в течении нескольких минут при 800°C .

Рабочая кремнеемкость – это количество SiO_3^{2-} , г-экв, которое поглощает 1 м^3 анионита. Она зависит от pH воды, начальной концентрации SiO_3 в обрабатываемой воде, удельного расхода щелочи на регенерацию, скорости фильтрования и других факторов.

Свежий пар – перегретый пар, вырабатываемый котельным агрегатом.

Сульфатный остаток – сухой остаток, обработанный серной кислотой, в результате все катионы переходят в сернокислые соединения (сульфаты), общая масса которых и дает сульфатный остаток.

Сухим остатком воды называется суммарное количество нелетучих веществ, присутствующих в воде в коллоидном и молекулярно-дисперсном состоянии, выраженное в мг/кг.

Фильтрация – это процесс осветления воды путём пропуска её через пористый материал, на поверхности и в порах которого вода оставляет грубодисперсные примеси.

Фильтроцикл – время работы фильтра между двумя последовательными промывками.

ФРА – фильтр-регенератор анионита.

ФРК – фильтр-регенератор катионита.

ФСД – фильтр смешанного действия.

Шлам – рыхлые отложения, получающиеся в результате оседания, скопления и уплотнения взвешенных веществ, образовавшихся в воде

Щелочность – это общее содержание веществ, которые при разложении или реакции с водой обуславливают равномерную концентрацию ионов OH^- ; HCO_3^- ; CO_3^{2-} .

Щелочноземельные накипи, состоящие в основном из соединений кальция и магния. К таким соединениям относятся: CaCO_3 , CaSO_4 , CaSiO_3 , $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$, MgO , $\text{Mg}(\text{OH})_2$, $\text{Mg}(\text{PO}_4)_2$. В зависимости от того, какие из этих соединений преобладают, различают накипи карбонатные CaCO_3 , сульфатные CaSO_4 , фосфатные $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ и т.д. Возможны накипи смешанного типа, когда многие соединения присутствуют в небольшом количестве.

Заключение

В данном методическом пособии МДК 05.01 «Водоподготовка» представлены темы для самостоятельного изучения междисциплинарного курса с полным курсом лекций и содержит задания для выполнения домашней контрольной работы для студентов заочной формы обучения специальности 13.02.02 Теплоснабжение и теплотехническое оборудование.

Список использованных источников

1. Стоянов, Н. И. Водоподготовка: курс лекций / Н. И. Стоянов, Е. И. Беляев, Й. Я. Куклите ; Северо-Кавказский федеральный университет. – Ставрополь : Северо-Кавказский Федеральный университет (СКФУ), 2018. – 109 с. : схем., табл. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=494813> (дата обращения: 22.05.2021). – Текст : электронный.
2. Сибатуллина, А. М. Водоснабжение : учебное пособие / А. М. Сибатуллина ; Поволжский государственный технологический университет. – Йошкар-Ола : Поволжский государственный технологический университет, 2018. – Ч. 2. Водоподготовка. – 152 с. : ил. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=494223> (дата обращения: 22.05.2021). – Библиогр.: с. 141. – ISBN 978-5-8158-1635-0. - ISBN 978-5-8158-1972-6 (ч. 2). – Текст : электронный.
3. Летовальцев, А. О. Химическая технология: металлургия, коррозия металлов и способы защиты от нее, сырьевое и энергетическое обеспечение химических производств, химическое материаловедение : [16+] / А. О. Летовальцев, Е. А. Решетникова ; Южный федеральный университет. – Ростов-на-Дону ; Таганрог : Южный федеральный университет, 2019. – 102 с. : ил. – Режим доступа: по подписке. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=577873> (дата обращения: 22.05.2021). – Библиогр. в кн. – ISBN 978-5-9275-3174-5. – Текст : электронный.
4. Технология очистки сточных вод : учебное пособие / сост. А.П. Карманов, И.Н. Полина. - 2-е изд., испр. и доп. - Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2018. - 213 с. : ил. - Библиогр.: с. 210 - ISBN 978-5-9729-0238-5 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=493888>
5. Белан Ф.И. Водоподготовка: Учебник для техникумов. – 3-е изд., перераб. – М.: Энергия, 1979, - 208 с., ил.
6. Соколов Б.А. Вспомогательное оборудование котлов. Водоподготовка: учеб. пособие – М.: Издательский центр «Академия», 2009, - 64 с.
7. Кургаев, Е.Ф. Осветлители воды / Е.Ф. Кургаев. - Издание второе, исправленное и дополненное. - Москва: Издательский Дом «Аква-Терм», 2012. - 100 с.; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=97865>
8. Водоподготовка: справочник / ред. С.Е. Беликова. - Москва: Издательский Дом «Аква-Терм», 2007. - 241 с. - ISBN 978-5-902561-09-5; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=97864>

9. Василевская, Е.И. Неорганическая химия : учебное пособие / Е.И. Василевская, О.И. Сечко, Т.Л. Шевцова. - Минск : РИПО, 2015. - 247 с. : схем., ил. - Библиогр. в кн. - ISBN 978-985-503-488-0 ; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=463695>

10. Аппараты магнитной обработки воды. Проектирование, моделирование и исследование: монография / С.Н. Антонов, А.И. Адошев, И.К. Шарипов, В.Н. Шемякин. - Ставрополь: Агрус, 2014. - 220 с.: ил., табл. - Библиогр. в кн. - ISBN 978-5-9596-0969-6; То же [Электронный ресурс]. - URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=277451>