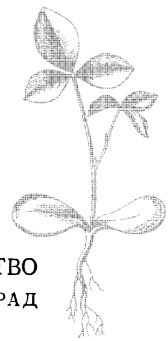
Ф. И. БЕЛАН

ВОДОПОДГОТОВКА



ГОСУДАРСТВЕННОЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МОСКВА 1958 ЛЕНИНГРАД

Scan AAW

ЭТ-4-3

Книга составлена применительно к действующей программе по водоподготовке для теплотехнических специальностей энергетических техникумов. В ней изложены основные вопросы, касающиеся подготовки воды для нужд паровых котлов.

Книга предназначена в качестве учебника для учащихся теплотехнических специальностей энергетических техникумов. Она может быть также использована в качестве учебного пособия при обучении производственного персонала.

Федор Иванович Белан

ВОДОПОДГОТОВКА

Редактор *С. М. Гурвич* Техн. редактор *К. П. Воронин*

Сдано в набор 18/VI 1958 г. Подписано к печати 29/IX 1958 г.
Т-06196. Бумага 84×108$^{1}/_{32}$ 13,1 печ. л. Уч.-изд. л. 15,3.
Тираж 10000 экз. Цена 8 р.65 к. Заказ 1299

Типография Госэнергоиздата. Москва, Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Предлагаемая книга является учебником по курсу «Водоподготовка» для теплотехнических специальностей энергетических техникумов. Она может быть использована также в качестве учебного пособия в системе производственного обучения эксплуатационного персонала.

Из большого круга вопросов, охватываемых водоподготовкой, автор стремился выбрать наиболее важные и изложить материал в доступной для учащихся форме. Автор старался также привести материал, отражающий последние достижения техчики обработки воды, и иллюстрировать его в должной мере наглядными схемами, графиками и рисунками. Для облегчения пользования учебником материал, более подробно освещающий рассматриваемый вопрос или дающий по нему дополнительные сведения, набран петитом.

При составлении данной книги автор встретился со многими трудностями, обусловленными главным образом стремлением его удовлетворить многим требованиям, которые обычно предъявляются к учебнику. Он не уверен в том, что его книга лишена недостатков. Поэтому автор будет весьма признателен преподавателям, читающим указанную дисциплину, и всем читателям, пользующимся этой книгой, за указания и критику недостатков, которых автору, возможно, не удалось избежать. Все замечания просьба присылать по адресу: Москва, Ж-114, Шлюзовая наб., 10, Госэнергоиздат.

В заключение автор выражает свою благодарность инж. С. М. Гурвичу, взявшему на себя труд по редактированию настоящей книги и способствовавшему ее улучшению.

Автор

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3

Введение

0-1. Содержание и значение водоподготовки для надежной эксплуатации электростанций 7
0-2. Пароводяной цикл электростанций 8

Глава первая

Водные растворы и их свойства

1-1. Растворимость твердых веществ в воде 12
1-2. Растворимость газов в воде 14
1-3. Способы выражения концентрации растворов 15
1-4. Температура кипения растворов 18
1-5. Электролитическая диссоциация 20
1-6. Водородный показатель 23
1-7. Гидролиз 25

Глава вторая

Качество природных вод

2-1. Вещества, загрязняющие природные воды 26
2-2. Основные показатели качества воды 29
2-3. Характеристика природных вод 32

Глава третья

Образование отложений в паровых котлах и теплообменниках и их предотвращение

3-1. Образование отложений в паровых котлах 35
3-2. Количество, состав и свойства отложений 42
3-3. Методы борьбы с отложениями в паровых котлах 44
3-4. Удаление образовавшихся отложений 53
3-5. Предотвращение образования отложений в конденсаторах паровых турбин 57

Глава четвертая

Загрязнение пара и способы борьбы с ним

4-1. Унос веществ насыщенным паром 61
4-2. Факторы, влияющие на качество пара 64
4-3. Образование солевых отложений в пароперегревателях и турбинах и их удаление 72
4-4. Сепарационные устройства 76
4-5. Продувка паровых котлов 81
4-6. Вывод солей из цикла теплосиловой установки 88
4-7. Ступенчатое испарение 91

Глава пятая

Коррозия паросилового оборудования и борьба с ней

5-1. Сущность и формы проявления коррозии металлов 99
5-2. Основные факторы коррозии 102
5-3. Коррозия водоконденсатного тракта электростанции 104
5-4. Коррозия паровых котлов 108

Глава шестая

Дегазация и обескислороживание воды

6-1. Термическая дегазация (деаэрация) воды 116
6-2. Химическое обескислороживание воды 122
6-3. Десорбционное обескислороживание воды 127

Глава седьмая

Контроль качества воды и пара

7-1. Общие требования к химическому контролю 129
7-2. Отбор проб воды и пара 130
7-3. Контроль качества пара методом электропроводности . . . 133
7-4. Способы обогащения проб пара 136
7-5. Теплохимические испытания паровых котлов 140
7-6. Нормы качества питательной, котловой воды и пара 141

Глава восьмая

Удаление из воды грубодисперсных и коллоидных примесей

8-1. Осветление воды 146
8-2. Коагуляция воды 154
8-3. Обезмасливание конденсата 164

Глава девятая

Обработка воды методом осаждения накипеобразователей

9-1. Процессы умягчения и расход реагентов 166
9-2. Аппаратура известковых установок 170

9-3. Способы улучшения работы отстойников 176
9-4. Способы приготовления и дозирования известкового молока 180
9-5. Схемы известковых водоподготовительных установок 184
9-6. Эксплуатация известковых водоподготовительных установок 185

Глава десятая

Обработка воды методом катионного обмена

10-1. Сущность процесса катионирования 186
10-2. Характеристика и свойства катионитов 191
10-3. Устройство и работа катионитного фильтра 195
10-4. Приготовление рабочего раствора соли и кислоты 202
10-5. Эксплуатация катионитных установок 204

Глава одиннадцатая

Схемы катионитных водоподготовительных установок

11-1. Натрий-катионитные установки 206
11-2. Водород-натрий-катионитные установки 209

Глава двенадцатая

Обессоливание и обескремнивание воды

12-1. Обескремнивание воды 213
12-2. Обессоливание воды методом ионного обмена 214
12-3. Электрохимическое обессоливание воды 224
12-4. Обессоливание воды термическим способом 226

Приложения

1. Расчет водоподготовительной установки 230
2. Расчет водного режима котлов 245
3. Расчет фосфатного режима котлов 248
4. Качество воды, обработанной по различным схемам 251
5. Молекулярные и эквивалентные веса употребительных соединений 253
6. Растворимость и произведение растворимости некоторых трудно растворимых веществ 254
7. Удельные веса водных растворов некоторых веществ 254
8. Качество реагентов 255
Литература 256

ВВЕДЕНИЕ

0-1. Содержание и значение водоподготовки для надежной эксплуатации электростанций

Использование воды в паровых котлах связано с рядом затруднений, которые возникают главным образом из-за того, что она содержит вещества, способные нарушать нормальную работу котла или турбины. Из воды или под ее воздействием на внутренних поверхностях нагрева котлов нередко возникают накипные отложения, которые, обладая низкой теплопроводностью, вызывают перегрев металла труб, уменьшающий его прочность. Поэтому изучение способов поддержания внутренних поверхностей нагрева котлов и другого теплосилового оборудования в безнакипном состоянии является одной из основных задач водоподготовки.

Вследствие ряда причин некоторое количество примесей, содержащихся в котловой воде, переходит в вырабатываемый котлом пар. При этом оказывается, что отдельные примеси, как например, кремниевая кислота, склонны при некоторых условиях переходить из воды в пар в большем количестве, чем другие. Унесенные из котла примеси выпадают из парового потока по тракту его движения в виде различных твердых соединений, образующих иногда значительные отложения в пароперегревателях котлов и проточной части турбин, что приводит к нарушению их нормальной работы. Поэтому предотвращение уноса из котла примесей паром или ограничение его некоторым допустимым минимумом является весьма важным для обеспечения надежной работы электростанций. Решение вопросов, относящихся к этой проблеме, составляет содержание второй важной задачи водоподготовки.

Металл (сталь, чугун, медные сплавы) на различных участках пароводяного тракта электростанции омывается водой разного состава. При этом иногда создаются усло-

вия, при которых вода или пар на отдельных участках приобретают агрессивные свойства и разрушают металл. Этот процесс, называемый коррозией, может при известных условиях нарушать нормальную работу теплосилового оборудования. Обеспечение надежной работы электростанций предполагает, следовательно, устранение не только накипных отложений и солевых заносов, но и коррозионных повреждений. Поэтому рассмотрение способов и средств предупреждения коррозии оборудования составляет задачу специального раздела водоподготовки.

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

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 ею процессов.

0-2. Пароводяной цикл электростанции

Пароводяной цикл современных электрических станций характеризуется наличием различных потоков воды, пара и конденсата, которые оказывают влияние на качество питательной воды котлов.

Забираемая из источника водоснабжения вода называется *исходной* (иногда *сырой*, *необработанной*). Обычно исходная вода подвергается специальной химической обработке для улучшения ее качества. Установки, на которых производится такая обработка, называются *водоподготовительными*, а вода, полученная в результате обработки, — *химически обработанной*. Вода, поступающая в котлы, носит название *питательной*, а находящаяся в них — *котловой воды*.

На рис. 0-1 представлена принципиальная схема пароводяного цикла электростанции, вырабатывающей наряду с электроэнергией также и тепловую энергию, отдаваемую

потребителям в виде горячей воды и пара. Выработанный котлом *1* насыщенный пар поступает через пароперегреватель *2* в турбину *3*, вращающую электрогенератор *4*. Отработавший в турбине пар направляется в конденсатор *5*, охлаждаемый водой *6*, которая называется циркуляционной, оборотной или охлаждающей. Турбинный конденсат конденсатным насосом *7* подается в деаэратор *8* через подогреватели низкого давления (ПНД) *9*. Деаэратор служит для удаления содержащихся в воде газов.

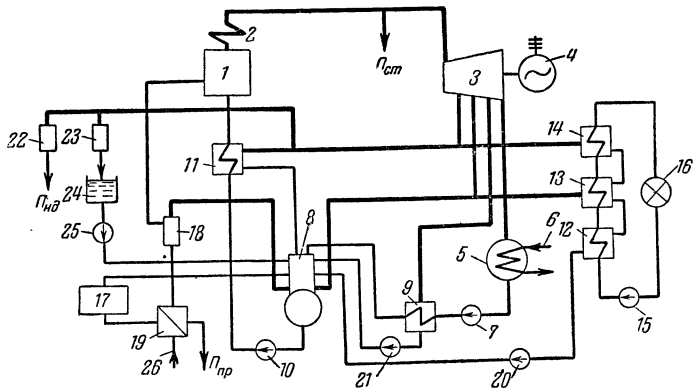


Рис. 0-1. Схема пароводяного цикла электростанции.

Питательным насосом *10* вода из деаэратора через подогреватели высокого давления *11* (ПВД) подается в котел.

Описанный здесь замкнутый цикл: котел — турбина — конденсатор — деаэратор — котел, является главным или основным. В таком виде он на практике неосуществим, так как в реальных условиях количество подаваемой в котел питательной воды всегда больше количества получаемого конденсата вследствие неизбежных потерь пара, конденсата и воды.

Для отпуска потребителям *16* тепла в виде горячей воды на станции устанавливаются отопительные подогреватели (бойлеры) *12*, *13*, *14*, в которых вода, называемая сетевой, подогревается отборным паром из турбины до необходимой температуры. Циркуляция воды осуществляется насосом *15*. Конденсат из бойлеров и регенеративных подогревателей (ПНД) конденсатными насосами *20* и *21* направляется в деаэратор. Пар, отдаваемый на производство, используется заводскими потребителями *22* и *23* на различные цели. От характера этого использова-

ния зависит возможность возврата конденсата в питательную систему котлов. В рассматриваемой схеме условно принято, что сбор и возврат конденсата осуществляются только одним потребителем, а на другом пар теряется безвозвратно.

Возвращаемый с производства конденсат, если качество его удовлетворяет установленным нормам, направляется в деаэратор непосредственно или через промежуточную емкость *24*, откуда он насосом *25* направляется в деаэратор. В противном случае он подается на водоподготовку для соответствующей обработки (обезмасливания, умягчения, обезжелезивания).

Выводимое из котла с непрерывной продувкой небольшое количество котловой воды направляется в расширитель *18*. Образующийся в нем пар поступает в деаэратор, а вода направляется в теплообменник *19*, после которого она обычно сбрасывается в канализацию. В теплообменнике *19* за счет тепла продувочной воды подогревается сырая вода *26*, поступающая затем на водоподготовительную установку *17*.

Из рассмотрения описанной схемы можно выделить следующие потоки, поступающие в питательную систему котлов: конденсат турбинный, отопительных бойлеров, регенеративных подогревателей, производственный конденсат и химически обработанная вода. Кроме конденсата регенеративных подогревателей, все остальные потоки могут вносить загрязнения в питательную воду.

В пароводяном цикле станции и вне его всегда имеют место потери конденсата и воды. К таким потерям относятся внутристанционные $П_{ст}$, потери на производстве $П_{нд}$ и потери продувочной котловой воды $П_{пр}$. Размер общих потерь определяется суммой:

$$П_о = П_{ст} + П_{нд} + П_{пр}. \qquad (0\text{-}1)$$

Величина $П_о$ выражается чаще всего в процентах от количества питательной воды. Величины $П_{ст}$ и $П_{нд}$ принято также выражать в процентах от суммарной паропроизводительности котлов. Количество добавляемой в питательную систему котлов воды $Q_д$ для восполнения потерь конденсата называется добавкой и часто выражается в процентах от количества питательной воды $D_{пв}$ [*т/ч*]:

$$\alpha_д = \frac{Q_д}{D_{пв}} 100\%. \qquad (0\text{-}2)$$

Добавляемой водой могут быть химически обработанная Q_x и дистиллят $Q_{дт}$ (конденсат вторичного пара испарителей), т. е.

$$Q_д = Q_x + Q_{дт}. \qquad (0\text{-}3)$$

Чаще всего, однако, восполнение потерь производится только химически обработанной водой. Величина отношения

$$\alpha_x = \frac{Q_x}{D_{пв}} 100\% \qquad (0\text{-}4)$$

называется добавкой химически обработанной воды.

Если в химически обработанной воде содержится S_x [*мг*] различных веществ в 1 *л*, то в питательную воду вносится

$$S^o_{пв} = \frac{\alpha_x}{100} S_x \ [мг/л] \qquad (0\text{-}5)$$

этих веществ. Величина $S^o_{пв}$ характеризует степень напряженности водного режима котлов. Большего внимания и усилий со стороны эксплуатационного персонала требует водный режим котлов той электростанции (из нескольких сравниваемых), для которой значение $S^o_{пв}$ будет наибольшим. Эту величину можно назвать солевой добавкой. На практике всегда стремятся сделать эту величину минимальной. Это можно достигнуть уменьшением α_x или S_x. Первое означает необходимость максимального сокращения потерь конденсата $П_o$. Второе связано с удалением растворенных в воде веществ, что осуществляется специальной ее обработкой, называемой обессоливанием. Есть и третий путь, основанный на применении мероприятий, которые допускают высокие солевые добавки.

Конденсат является наиболее ценной составляющей питательной воды именно в силу того, что в нем содержится весьма мало растворенных веществ. Следует, однако, учитывать возможность ухудшения качества конденсата турбин за счет подсоса в него охлаждающей воды.

Глава первая

ВОДНЫЕ РАСТВОРЫ И ИХ СВОЙСТВА

1-1. Растворимость твердых веществ в воде

Раствором называется такая система, в которой одно вещество равномерно распределено в среде другого вещества. Различают растворы *ненасыщенные, насыщенные и перенасыщенные. Насыщенным называется раствор, в котором данное вещество больше не растворяется.*

Процесс растворения и обратный ему процесс кристаллизации протекают одновременно и непрерывно. Но в насыщенном растворе устанавливается равенство скоростей этих противоположно направленных процессов. Равновесие, таким образом, является подвижным. В ненасыщенном растворе скорость растворения больше скорости кристаллизации и вещество будет растворяться. При внесении твердого вещества в его пересыщенный раствор начнет выделяться осадок, так как скорость кристаллизации будет превышать скорость растворения. Выделение осадка, следовательно, становится возможным только в пересыщенных растворах.

Растворение твердых веществ сопровождается разрушением их кристаллической структуры, требующим затраты некоторой работы. Какова природа сил, которые производят эту работу?

Молекула воды построена таким образом, что атомы водорода располагаются по одну сторону от атома кислорода под некоторым углом. При этом единственные электроны атомов водорода оказываются смещенными ближе к атому кислорода. Ввиду этого отрицательные (электронная оболочка) и положительные (ядра водорода) электрические заряды оказываются разобщенными и образуют как бы два полюса (диполь), делающие молекулу воды полярной. Молекулы любого вещества, обладающие несимметричным распределением электрических зарядов, будут также обладать полярностью.

Кристаллы многих солей построены не из молекул, а из ионов, образующих подобие пространственной решетки. Ионами называют электрически заряженные частицы, которые образуются из атомов (или атомных групп) путем потери или присоединения электронов.

При внесении такого кристалла в воду его ионы будут вступать во взаимодействие с противоположно заряженными полюсами молекул воды. *Явление взаимодействия ионов вещества с полярными молекулами воды, т. е. образование связи между ними, носит название гидратации ионов.* Насколько велика энергия гидратации, можно видеть из следующего примера. Энергия связи ионов NaCl в кристалле составляет 183 *ккал/моль*. Энергия же гидратации этих ионов равна 177 *ккал/моль*, недостающие 6 *ккал/моль* покрываются за счет энергии теплового движения молекул. Следовательно, работа разъединения ионов при растворении производится в основном за счет их гидратации.

Из изложенного следует, что в водном растворе вещества, способные к ионизации (электролиты — соли, основания, кислоты), присутствуют главным образом в виде гидратированных ионов, поэтому все химические реакции, протекающие в водном растворе, происходят между ионами. Гидратная оболочка иногда настолько прочно связана с ионами растворенного вещества, что при выделении его из раствора входит в состав кристалла. Такая вода называется *кристаллизационной*. Многие реагенты, применяемые в водоподготовке, имеют в своем составе кристаллизационную воду, которую следует принимать в расчет при определении их расхода.

Весовое количество вещества, которое необходимо растворить, чтобы получить насыщенный раствор, называется растворимостью данного вещества. Она обычно выражается количеством граммов вещества, содержащихся в 1 *л* или 100 *г* раствора.

Растворимость зависит от температуры раствора. При этом для одних веществ с ростом температуры она увеличивается (вещества с положительным коэффициентом растворимости), для других — падает (вещества с отрицательным коэффициентом растворимости (рис. 1-1), для некоторых же веществ растворимость обнаруживает сложную зависимость от температуры. Характер изменения растворимости с ростом температуры раствора имеет существенное значение для водоподготовки. Так, вещества с отрицательным коэффициентом растворимости будут выделяться и давать отложения на наиболее теплонапряженных поверхностях нагрева котла.

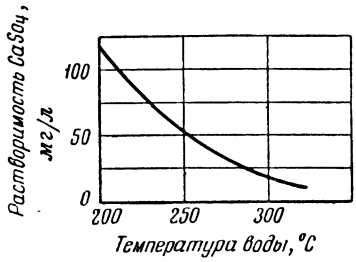


Рис. 1-1. Растворимость сульфата кальция.

Численные значения растворимости изменяются в широких пределах. Одни вещества растворяются в воде хорошо, и растворимость их измеряется сотнями граммов

в 1 *л*. Растворимость других едва достигает двух—трех десятков миллиграммов в 1 *л* воды. Это — труднорастворимые вещества.

1-2. Растворимость газов в воде

Количество растворяющегося в воде газа зависит от многих условий, но для данной температуры и малых давлений оно определяется законом Генри, который гласит: *количество газа, растворенного при данной температуре в единице объема жидкости, пропорционально давлению*

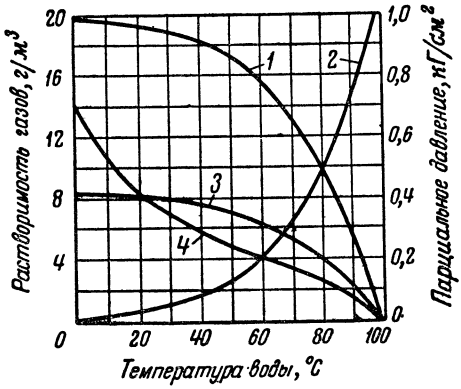


Рис. 1-2. Растворимость кислорода в воде при атмосферном давлении.

1, 2, 3 — парциальное давление соответственно воздуха, водяного пара и кислорода; *4* — растворимость кислорода.

этого газа над ней. Практически вода в природе находится в контакте с воздухом, т. е. смесью газов — азота, кислорода, углекислоты и др. Давление, развиваемое смесью газов, определяется законом Дальтона, согласно которому *общее давление смеси газов равно сумме давлений ее составных частей.* Давление, которое создавал бы данный газ (например, кислород), входящий в состав смеси, если бы он один занимал тот же объем, что и смесь, называется *парциальным* (частичным). Следовательно, можно сказать, что общее давление смеси газов равно сумме их парциальных давлений.

В газе, находящемся над водою, всегда присутствуют водяные пары. Следовательно, общее давление в этом слу-

чае (P_o) будет равно сумме парциальных давлений газа ($P_г$) и водяных паров ($P_п$):

$$P_o = P_г + P_{вп}. \tag{1-1}$$

Растворимость газа (G) будет определяться следующим равенством, выражающим закон Генри:

$$G = KP_г = K(P_o - P_{вп}) \ [г/л], \tag{1-2}$$

где K — коэффициент пропорциональности.

Если воду начать нагревать, то $P_{вп}$ будет увеличиваться, пока не наступит равенство $P_o = P_{вп}$, характеризующее состояние кипения воды. Из (1-2) легко видеть, что растворимость газов при этом будет равна нулю (рис. 1-2). Этот вывод является важным, так как он широко используется на практике, когда необходимо удалить из воды растворенные газы.

1-3. Способы выражения концентрации растворов

Количество вещества, содержащееся в определенном объеме или определенном весовом количестве раствора, называется концентрацией раствора или концентрацией данного вещества в растворе.

Концентрацию растворов можно выразить различными способами. В водоподготовке наиболее часто концентрация растворов выражается: весовыми процентами, объемной концентрацией, количеством грамм-молекул (молярная концентрация) или грамм-эквивалентов (нормальная или эквивалентная концентрация), содержащимся в 1 *л* раствора. Количество весовых частей вещества, приходящееся на 100 весовых частей раствора, дает концентрацию его в процентах $C_{вп}$:

$$C_{вп} = \frac{g}{10^3 V_p \gamma_p} 100 \ [\%], \tag{1-3}$$

где V_p — объем раствора, *л*;

g — весовое количество вещества, растворенное в объеме V_p, *г*;

γ_p — удельный вес раствора, *кг/л*.

Этот способ применяется главным образом для выражения концентрации растворов реагентов, употребляемых на водоподготовительных установках.

Объемная концентрация $C_{ок}$ определяется количеством миллиграммов (граммов, килограммов) вещества, содержащимся в единице объема (литре, куб. метре):

$$C_{ок}=\frac{g}{V_p}[г/л], \tag{1-4}$$

или

$$C'_{ок}=\frac{g\cdot 10^3}{V_p}[мг/л]. \tag{1-5}$$

Молярная концентрация $C_м$ показывает, сколько грамм-молекул данного вещества растворено в 1 $л$ раствора:

$$C_м=\frac{C_{ок}}{M}=\frac{g}{V_pM}[моль/л], \tag{1-6}$$

где M — молекулярный вес вещества.

Наиболее часто в водоподготовке концентрация растворов выражается числом эквивалентов вещества, которое находится в 1 $л$ раствора. *Эквивалентом данного вещества называется его весовое количество, выраженное в миллиграммах или граммах и соответствующее в данной реакции одному атому водорода (или другого одновалентного элемента) или переходу одного электрона (в окислительно-восстановительных реакциях).* Миллиграмм-эквивалентом ($Э_к$) называется количество вещества в миллиграммах, отвечающее его эквиваленту. Для нахождения величины $Э_к$ необходимо молекулярный вес вещества разделить на его валентность (n) в данной реакции:

$$Э_к=\frac{M}{n}. \tag{1-7}$$

Величина эквивалента для многих соединений не является постоянным числом, так как зависит от типа реакции. Если, например, рассмотреть реакции нейтрализации угольной кислоты едким натром:

$$\left.\begin{aligned} &2\,NaOH + CO_2 \rightarrow Na_2CO_3 + H_2O;\\ &NaOH + CO_2 \rightarrow NaHCO_3, \end{aligned}\right\} \tag{1-8}$$

то в первой из них эквивалент CO_2 равен 22, а во второй — 44. В реакции

$$3Ca^{2+} + 2PO_4^{3-} \rightarrow Ca_3(PO_4)_2 \tag{1-9}$$

эквивалент PO_4^{3-} равен 31,7, в другой же аналогичной реакции

$$10Ca^{2+} + 6PO_4^{3-} + 2OH^- \rightarrow 3Ca_3(PO_4)_2\,Ca(OH)_2 \tag{1-10}$$

он составит 28,5. Однако для многих веществ, встречающихся в водоподготовке, значение эквивалента постоянно и может быть вычислено по формуле (1-7).

Таким образом, чтобы выразить концентрацию раствора в миллиграмм-эквивалентах $C_э$, необходимо найти концентрацию растворенного вещества в *мг/л* и разделить ее на эквивалентный вес:

$$C_э = \frac{C'_{ок}}{Э_к} = \frac{g \cdot 10^3}{V_р Э_к} [мг\text{-}экв/л]. \qquad (1\text{-}11)$$

Кроме миллиграмм-эквивалентов в водоподготовке применяется единица, в 1 000 раз меньшая, называемая микрограмм-эквивалентом (*мкг-экв/л*). При пересчете одних единиц концентрации растворов в другие могут быть использованы формулы табл. 1-1.

Таблица 1-1

Формулы для пересчета одних единиц концентрации в другие

Данная концентрация	Искомая концентрация				
	$C_{вп}$	$C_{ок}$	$C'_{ок}$	$C_м$	$C_э$
$C_{вп}$	—	$10C_{вп}\gamma_р$	$10^4 C_{вп}\gamma_р$	$\frac{10C_{вп}\gamma_р}{M}$	$\frac{10^4 C_{вп}\gamma_р}{Э_к}$
$C_{ок}$	$\frac{C_{ок}}{10\gamma_р}$	—	$10^3 C_{ок}$	$\frac{C_{ок}}{M}$	$\frac{10^3 C_{ок}}{Э_к}$
$C'_{ок}$	$\frac{10^{-4} C'_{ок}}{\gamma_р}$	$10^{-3} C'_{ок}$	—	$\frac{10^{-3} C'_{ок}}{M}$	$\frac{C'_{ок}}{Э_к}$
$C_м$	$\frac{C_м M}{10\gamma_р}$	$MC_м$	$10^3 C_м M$	—	$\frac{10^3 C_м M}{Э_к}$
$C_э$	$\frac{10^{-4} C_э Э_к}{\gamma_р}$	$10^{-3} C_э Э_к$	$C_э Э_к$	$\frac{10^{-3} C_э Э_к}{M}$	—

Необходимость в таком пересчете возникает, в частности, при проверке правильности химического анализа воды. При полном анализе содержание в ней кальция, магния, натрия, аммония, железа, алюминия, хлоридов, сульфатов, нитратов, карбонатов, бикарбонатов и силикатов обычно выражают в миллиграммах в 1 *л*, а жесткость ($Ж_о$) и щелочность ($Щ_о$) — в миллиграмм-эквивалентах в 1 *л*. Если анализ выполнен правильно, то сумма всех положительных зарядов, обусловленных различными катионами, должна быть равна сумме

всех отрицательных зарядов, обусловленных анионами, т. е. должно соблюдаться равенство:

$$\frac{(Na^+)}{22{,}997}+\frac{(Ca^{2+})}{20{,}04}+\frac{(Mg^{2+})}{12{,}16}+\frac{(NH_4^+)}{18{,}04}=$$

$$=\frac{(Cl^-)}{35{,}456}+\frac{(SO_4^{2-})}{48{,}03}+\frac{(NO_3^-)}{62{,}008}+Щ_o.$$

Символы в скобках означают концентрацию соответствующего иона в *мг/л*. В этом равенстве не участвуют железо, алюминий, кремнекислота, ионы CO_3^{2-} и HCO_3^-. Ионы SiO_3^{2-}, $HSiO_3^-$, CO_3^{2-} и HCO_3^- входят в состав щелочности ($Щ_o$); железо и алюминий могут присутствовать в виде ионов лишь в сильно кислой среде или при полном отсутствии кислорода (двухвалентное железо).

Кроме того, при правильно выполненном анализе должно иметь место равенство

$$H_o=\frac{(Ca^{2+})}{20{,}04}+\frac{(Mg^{2+})}{12{,}16}.$$

1-4. Температура кипения растворов

Давление насыщенного пара, т. е. пара, находящегося в равновесии с жидкостью, является важной характеристикой водных растворов. Опытом установлено, что оно уменьшается с ростом концентрации раствора. Уменьшение давления насыщенного пара обусловливает повышение температуры кипения раствора, поскольку жидкость начинает кипеть, когда давление пара становится равным внешнему давлению. Это свойство растворов играет важную роль в процессах, протекающих в теплонапряженных экранных трубах и пароперегревателях паровых котлов и связанных с глубоким упариванием котловой воды.

Процесс испарения воды сопровождается ростом концентрации растворенных в ней веществ. Это, в свою очередь, вызывает повышение температуры кипения раствора. В связи с этим возникает вопрос, возможны ли в условиях парового котла случаи выпаривания воды досуха (например, в трубах с нарушенной циркуляцией) и при каких условиях?

Детальное рассмотрение этого вопроса показывает, что явление полного выпаривания в котле раствора и образование отложений твердых веществ (накипи) зависит от некоторых условий. Одно из них определяется составом раствора. Если в нем преобладают вещества, растворимость которых с ростом температуры уменьшается, то выпаривание

раствора становится более вероятным, чем в случае преобладания веществ с положительным коэффициентом растворимости.

Поскольку раствор кипит при температуре, более высокой ($t_р$), чем растворитель ($t_ж$), выпаривание раствора становится возможным лишь в том случае, когда температура стенки паропроизводящей трубы котла $t_{ст}$ будет выше $t_р$. Наибольшую температуру кипения имеют насыщенные рас-

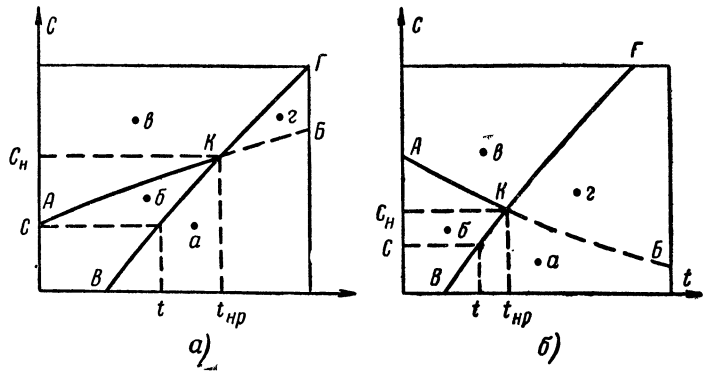


Рис. 1-3. Зависимость температуры кипения растворов от их концентрации.

творы ($t_{нр}$). Поэтому для полного выпаривания раствора необходимо, чтобы $t_{ст} > t_{нр}$. К этому сводится второе условие.

Более наглядно оно поясняется графиками рис. 1-3, построенными для веществ с положительным (*а*) и отрицательным (*б*) коэффициентом растворимости. Кривая *АБ* характеризует изменение растворимости данного вещества с температурой, а *ВГ* — изменение температуры кипения этого раствора с ростом давления пара в котле. Точка *В* соответствует температуре кипения чистого растворителя. При температуре t кипящий раствор будет иметь концентрацию C, меньшую концентрации насыщения. По мере испарения воды концентрация раствора будет приближаться к предельному ее значению $C_н$, когда раствор станет насыщенным. До этого момента выделение из раствора твердого вещества не будет иметь места. Однако с ростом концентрации будет увеличиваться и температура кипения раствора пока в точке *К* пересечения кривых *АБ* и *ВГ* она не достигнет своего критического значения $t_{нр}$. Если при этом $t_{ст} > t_{нр}$, то может происходить выделение из раствора твердого вещества, т. е. образование отложений. Точки *а*, *б*, *в* и *г* характеризуют раствор: *а* — перегретый ненасыщенный (область *ВКБ*); *б* — недогретый до температуры кипения, ненасыщенный (область *ВКА*); *в* — пересыщенный (об-

ласть *АКГ*); *г* — перегретый и пересыщенный (область *ГКБ*). Капелька котловой воды, попавшая с потоком пара в пароперегреватель, окажется выпаренной досуха, если состояние ее будет отвечать одной из точек области *ГКБ*.

Разность

$$\Delta t = t_{нр} - t_{ж}$$

является существенной характеристикой данного водного раствора. Она показывает, насколько температура стенки трубы должна быть выше температуры кипения чистого растворителя, чтобы водный раствор данной соли мог быть выпарен досуха в атмосфере водяного пара. Величина Δt зависит от давления и состава раствора, как это можно видеть из данных табл. 1-2. Если, например, при 35 *ата* $t_{ст}$ будет равна 260° С, то раствор Na_2SO_4, попавший на такую, стенку, будет испарен досуха, чего не произойдет с раствором NaCl и KCl.

Таблица 1-2

Температура кипения растворов при разных давлениях

Вещество	16 *ата*			35 *ата*			100 *ата*		
	$t_{нр}$	$t_{ж}$	Δt	$t_{нр}$	$t_{ж}$	Δt	$t_{нр}$	$t_{ж}$	Δt
Na_2SO_4	208	200,4	7,6	251	241,5	9,5	320	309,5	10,5
NaCl	214	200,4	13,6	259	241,5	17,5	349	309,5	39,5
KCl	220	200,4	19,6	270	241,5	28,5	382	309,5	72,5

Условия, необходимые для полного или глубокого упаривания раствора, создаются обычно в неудовлетворительно охлаждаемых парогенерирующих трубах котла, т. е. в трубах с нарушенной или вялой циркуляцией. Поэтому выпаривание котловой воды досуха в каком-либо месте трубной системы котла свидетельствует о нарушении циркуляции в данном контуре.

1-5. Электролитическая диссоциация

Вещества, распадающиеся в водном растворе на ионы и проводящие поэтому электрический ток (соли, основания, кислоты), называются *электролитами*. Ионизация этих веществ в водном растворе получила название электролитической диссоциации.

При диссоциации электролитов образуются различные ионы. Соли, например, всегда диссоциируют на катион металла и анион кислотного остатка:

$$NaCl \rightleftarrows Na^+ + Cl^-; \quad CaSO_4 \rightleftarrows Ca^{2+} + SO_4^{2-}.$$

Поэтому солями можно называть соединения, которые в водном растворе дают ионы металла и кислотного остатка.

При диссоциации оснований, например NaOH; NH_4OH, которые структурно можно изобразить следующей схемой: Na—O—H, NH_4—O—H, образуются катионы и общие для всех оснований ионы гидроксила

$$NaOH \rightleftarrows Na^+ + OH^-;$$

$$NH_4OH \rightleftarrows NH_4^+ + OH^-.$$

Из двух валентных связей кислорода Na—O и O—H более слабой оказывается первая, по которой и происходит разрыв молекулы — ее ионизация. Следовательно, основания можно определить как соединения, дающие в водном растворе ионы гидроксила.

Диссоциация кислот идет с образованием общих для всех кислот катионов водорода и анионов кислотного остатка:

$$HNO_3 = H—O—NO_2 \rightleftarrows H^+ + NO_3^-;$$

$$H_2SO_4 = \begin{matrix} H—O \\ H—O \end{matrix} \diagdown\!\diagup SO_2 \rightleftarrows 2H^+ + SO_4^{2-}.$$

Таким образом, кислотами называются соединения, образующие в водных растворах ионы водорода. Здесь имеет место явление, обратное указанному выше для диссоциации оснований: из двух валентных связей кислорода более легко ионизируется связь O—H. Из изложенного следует, что щелочность или кислотность среды определяется концентрацией ионов OH^- или H^+.

Основания и кислоты можно рассматривать как соединения типа ROH, если под R понимать катион металла или кислотный остаток. Если диссоциация происходит по связи R—O, имеем основание, если по O—H — кислоту. Существуют соединения, которые в водных растворах при соответствующих условиях могут диссоциировать по типу и оснований и кислот. Такие соединения носят название

амфотерных. Наиболее типичным представителем этого типа соединений является гидроокись алюминия $Al(OH)_3$, образующаяся при коагуляции воды сернокислым алюминием. В щелочной среде она переходит в раствор в виде алюмината

$$Al(OH)_3 + NaOH \rightleftarrows NaAlO_2 + 2H_2O.$$

В кислой среде гидроокись алюминия реагирует как щелочь, образуя соль кислоты:

$$2Al(OH)_3 + 3H_2SO_4 \rightleftarrows Al_2(SO_4)_3 + 6H_2O.$$

Вот почему при коагуляции воды, когда необходимо получение именно труднорастворимой $Al(OH)_3$, тщательно следят за тем, чтобы реакция среды не была сильно щелочной или сильно кислой.

Электролитическая диссоциация есть процесс обратимый: в каждый данный момент образуются как ионы за счет распада молекул, так и молекулы за счет соединения ионов:

$$NaCl \rightleftarrows Na^+ + Cl^-.$$

Отношение числа молекул, распавшихся на ионы, к общему числу растворенных молекул называется *степенью диссоциации* α, величина которой для 0,1 н растворов отдельных соединений имеет следующие значения:

Электролит	α
HNO_3, HCl	90 — 95
H_2SO_4	60
CH_3COOH	1,4
H_2CO_3	0,17
NaOH	90 — 95
NH_4OH	1,4

Сильными называют электролиты, степень диссоциации которых в 0,1 н растворе больше 30%, слабыми, если $\alpha < 5\%$. Если в разбавленном растворе присутствуют только сильные электролиты, например $NaNO_3$ и HCl, которые почти полностью ионизированы, то динамическое равновесие реакции

$$NaNO_3 + HCl \rightleftarrows HNO_3 + NaCl$$

установится тогда, когда течение реакции не имеет какого-либо заметно выраженного направления. Картина, однако, меняется, если в растворе присутствуют одновременно сильные и слабые электролиты, например CH_3COONa и HCl. В этом случае реакция

$$CH_3COONa + HCl \rightleftarrows CH_3COOH + NaCl$$

будет преимущественно идти вправо, т. е. в сторону образования слабодиссоциированной уксусной кислоты CH_3COOH. Такую же преимущественную направленность направо будут иметь и реакции

$$(NH_4)_2SO_4 + 2NaOH \rightleftarrows Na_2SO_4 + \uparrow NH_3 + 2H_2O;$$

$$CaCl_2 + Na_2CO_3 \rightarrow CaCO_3 + 2NaCl,$$

в которых образуются летучие (NH_3) или труднорастворимые ($CaCO_3$) соединения. Из изложенного вытекает, что реакции между ионами из всех возможных направлений идут в сторону образования малодиссоциированных, труднорастворимых или летучих соединений.

1-6. Водородный показатель

Опыт показывает, что молекулы воды также диссоциируют на ионы:

$$H_2O \rightleftarrows H^+ + OH^-.$$

Скорость распада молекул на ионы (v_1) будет пропорциональна концентрации молекул воды $[H_2O]$:

$$v_1 = K_1 [H_2O].$$

Скорость обратной реакции (v_2) пропорциональна произведению концентраций ионов $[H^+]$ и $[OH^-]$:

$$v_2 = K_2 [H^+] [OH^-].$$

В момент равновесия $v_1 = v_2$, или

$$K_1 [H_2O] = K_2 [H^+] [OH^-],$$

откуда

$$K = \frac{K_1}{K_2} = \frac{[H^+] [OH^-]}{[H_2O]}.$$

Вследствие малой степени диссоциации воды величину $[H_2O]$ также можно считать постоянной, тогда

$$K_в = K_{H_2O} = [H^+][OH^-]. \qquad (1\text{-}12)$$

Величина $K_в$ постоянна для данной температуры и называется *ионным произведением воды.*

Количество образующихся при диссоциации воды ионов H^+ и OH^-, выраженное числом грамм-ионов в 1 *л* (*г-ион/л*), весьма невелико. Установлено, что при 22° С ионное произведение воды составляет 10^{-14}, т. е.

$$K_в = 10^{-14} = [H^+][OH^-]. \qquad (1\text{-}13)$$

Реакция воды или раствора будет нейтральной, если $[H^+] = [OH^-]$. Заменяя на основании этого в формуле (1-13) $[OH^-]$ на $[H^+]$, найдем, что нейтральная реакция раствора характеризуется концентрацией ионов водорода, равной:

$$[H^+]^2 = (10^{-7})^2, \text{ или } [H^+] = 10^{-7} \text{ г-ион/л}.$$

Если вспомнить, что в одной грамм-молекуле (или грамм-ионе) содержится $6{,}02 \cdot 10^{23}$ молекул (ионов), то можно получить более конкретное представление о количестве ионов, образующихся при диссоциации воды. Так, число ионов водорода (и гидроксила) при нейтральной реакции в 1 *л* воды будет равно $6{,}02 \cdot 10^{23} \cdot 10^{-7} = 6{,}02 \cdot 10^{16}$, а в одном кубическом миллиметре $6{,}02 \cdot 10^{10}$, т. е. приблизительно 60 млрд. ионов водорода.

В 1 *л* воды содержится $1\,000 : 18 = 55{,}56$ грамм-молекулы воды, или $55{,}56 \cdot 6{,}02 \cdot 10^{23} = 335 \cdot 10^{23}$ молекул. Из этого количества только $6{,}02 \cdot 10^{16}$ диссоциировано на ионы, т. е. на каждые $335 \cdot 10^{23} : 6{,}02 \times \times 10^{16} = 556$ млн. молекул воды приходится о д н а, распавшаяся на ионы. Как видим, количество ионов в чистой воде громадно по абсолютной величине и одновременно относительно ничтожно мало.

В кислой среде, очевидно, должно быть $[H^+] > 10^{-7}$, а в щелочной $[H^+] < 10^{-7}$. Оперировать каждый раз числами с отрицательными показателями неудобно. Поэтому условились вместо величины концентрации ионов $[H^+]$ и $[OH^-]$ применять их отрицательные логарифмы. Отрицательный логарифм концентрации иона водорода называется *водородным показателем* и обозначается pH, т. е.

$$-\lg [H^+] = pH.$$

Выражение $pOH = -\lg [OH^-]$ будет называться гидроксильным показателем. Следовательно, равенство (1-13) можно представить в таком виде:

$$pH + pOH = 14,$$

Условие нейтральности будет, таким образом, определяться значением $pH = 7$; кислая среда характеризуется неравенствами $pH < 7$ и $pOH > 7$, а щелочная $pH > 7$ и $pOH < 7$.

Реакция среды, т. е. величина ее pH, играет важную роль во многих физико-химических процессах. Особое значение она приобретает в процессах электрохимической коррозии и коагуляции воды.

1-7. Гидролиз

Гидролизом называется обменное разложение растворенного вещества с водой. Если растворить в воде соль, образованную сильным основанием и слабой кислотой, например Na_2CO_3, то в растворе будет происходить химическое взаимодействие между ионами соли и ионами воды

$$Na_2CO_3 + H_2O \rightleftarrows NaHCO_3 + NaOH. \qquad (1\text{-}14)$$

Основание NaOH является сильным, и поэтому в растворе оно почти полностью диссоциировано. Это значит, что раствор будет содержать много свободных ионов OH^-. Наоборот, ион HCO_3^- почти не распадается на ионы и, следовательно, катион водорода будет связан им и удален из раствора. В результате концентрация ионов $[OH^-]$ в растворе окажется выше, чем $[H^+]$, т. е. будут иметь место соотношения $pOH < 7$ и $pH > 7$, характерные для щелочной реакции. Следовательно, раствор соли слабой кислоты и сильного основания будет иметь *щелочную реакцию.*

Для случая растворения в воде соли, образованной сильной кислотой и слабым основанием, например $FeCl_2$, можем написать следующую реакцию:

$$FeCl_2 + 2H_2O \rightleftarrows Fe(OH)_2 + 2HCl. \qquad (1\text{-}15)$$

Соляная кислота является сильной и поэтому полностью диссоциированной на ионы, в то время как основание $Fe(OH)_2$ является слабым и малодиссоциированным. В результате в растворе будет избыток ионов водорода и он приобретет кислую реакцию. К солям, растворы которых приобретают кислую реакцию, относятся, в частности, сернокислые соли железа $[FeSO_4, Fe_2(SO_4)_3]$ и алюминия $[Al_2(SO_4)_3]$, широко применяющиеся в качестве коагуляторов при коагуляции воды.

Соли, образованные сильной кислотой и сильным основанием, гидролизу не подвергаются, так как образуют хорошо диссоциирующие соединения.

Глава вторая

КАЧЕСТВО ПРИРОДНЫХ ВОД

2-1. Вещества, загрязняющие природные воды

Содержащиеся в природных водах вещества можно разделить на следующие три группы: *грубодисперсные (взвешенные)* вещества, *коллоиды и молекулярно-дисперсные вещества.*

Если в каком-либо веществе (среде) распределено другое вещество в виде мелких частичек, то такая система называется *дисперсной.* Совокупность распределенных частичек называется *дисперсной фазой,* а вещество, в котором они распределены,—*дисперсионной средой.* Так, имеющийся в воде осадок будет являться дисперсной фазой, а вода — дисперсионной средой.

Если с течением времени не наблюдается разделения дисперсной фазы и дисперсионной среды, система считается устойчивой. Устойчивость дисперсной системы в значительной мере зависит от размера частичек дисперсной фазы. Если они очень велики по сравнению с молекулами воды, то система будет неустойчивой и распределенное вещество выпадет в осадок или всплывет на поверхность в зависимости от величины его удельного веса. Такие неустойчивые системы называются *взвесями.* Взвеси разделяются на *суспензии и эмульсии.* В первом случае дисперсной фазой является твердое вещество (например, порошок мела, взболтанный с водой), во втором — жидкость (капельки масла в воде).

Система, в которой частички дисперсной фазы имеют размер примерно от 1 до 100 $m\mu$*, называется *коллоидным* раствором; распределенное вещество — *коллоидом.* Коллоидные растворы отличаются высокой устойчивостью. Если распределенное вещество раздроблено до размера молекул (<1 $m\mu$), то такая система, называемая *молекулярным* раствором, является весьма устойчивой. Сравнительные размеры частиц можно оценить по следующим данным (размер в $m\mu$): ион натрия — 0,26; молекула спирта — 0,5; молекула крахмала — 4—5; коллоидная частичка — 1—100; мелкие зерна крахмала — 3 000—4 000 Следует иметь в виду, что осадки в процессе своего образования и растворения проходят через область коллоидного состояния, что имеет существенное значение для водного режима паровых котлов.

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 во-

*Миллимикрон $m\mu = 10^{-6}$ *мм* $= 10^{-9}$ *м*.

доемы — реки, озера, пруды. Наибольшая концентрация этих веществ в поверхностных водах наблюдается в паводковые периоды.

Использование воды, загрязненной взвешенными веществами, затрудняет осуществление процессов ее химической обработки. Поэтому первой технологической операцией обработки такой воды является освобождение ее от грубодисперсных загрязнений. При анализе природных вод эти загрязнения обычно характеризуются весовым количеством, содержащимся в единице объема воды (*мг/л*, *г/л*), без указания их химического состава.

В коллоидном состоянии присутствуют в воде вещества как органического, так и минерального происхождения. Среди первых следует отметить вещества, известные под названием гуминовых, которыми особенно богаты воды болотного происхождения. Они окрашивают воду в желтый или коричневый цвет, а также вызывают помутнение воды, связанное с рассеиванием света (опалесценцией). Загрязнению воды органическими веществами способствуют процессы отмирания и распада различных водных организмов, а также сброс в водоемы промышленных неочищенных сточных вод. Не все органические вещества присутствуют в воде в коллоидном состоянии, часть из них находится в истинном растворе. Из неорганических веществ в коллоидном состоянии часто присутствуют в воде соединения железа, кремния и алюминия. Коллоидные загрязнения затрудняют работу паровых котлов, повышая склонность котловой воды к вспениванию и уносу ее паром. Поэтому они, по возможности, удаляются из воды при ее обработке.

К группе молекулярно-дисперсных веществ относятся растворенные в воде соли и газы. Поскольку соли в водном растворе в значительной степени диссоциированы, то наиболее чисто в природных водах встречаются следующие ионы: катионы Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, анионы Cl^-, SO_4^{2-}, HCO_3^-. Комбинируя эти ионы, можно в общем случае считать, что в природных водах присутствуют следующие соединения: $Ca(HCO_3)_2$, $Mg(HCO_3)_2$, $CaCl_2$, $MgCl_2$, $CaSO_4$, $MgSO_4$, Na_2SO_4 и $NaCl$.

Перечисленные шесть ионов являются наиболее распространенными, но не единственными из присутствующих в природных водах. Часто анализ отмечает наличие в них

обычно в незначительных количествах ионов азотистой NO_2^- (нитриты), азотной NO_3^- (нитраты) кислот и катионов аммония NH_4^+.

Присутствие в воде этих ионов свидетельствует о загрязнении водоема промышленными сточными водами (например, коксохимических, азотнотуковых заводов) или продуктами разложения органических веществ. Нитритный ион является особенно вредным, так как он вызывает так называемую нитритную коррозию паровых котлов.

Соединения двухвалентного (закисного) железа также нередко встречаются в природных водах. Повышенное их содержание является характерным для многих подземных вод.

В них железо присутствует главным образом в виде бикарбоната железа $Fe(HCO_3)_2$, являющегося устойчивым лишь в присутствии больших количеств CO_2:

$$Fe(HCO_3)_2 \rightleftarrows Fe(OH)_2 + 2CO_2,$$

удаление которой из воды приводит к сдвигу реакции вправо, т. е. к распаду $Fe(HCO_3)_2$ с образованием гидрозакиси железа $Fe(OH)_2$, что используют при обезжелезивании грунтовых вод: содержащую железо воду разбрызгивают (аэрируют) или продувают воздухом для удаления углекислоты. Образующийся $Fe(OH)_2$ окисляется при этом кислородом воздуха до $Fe(OH)_3$, который выпадает в осадок, удаляемый затем из воды. В паровых котлах соединения железа образуют осадок, способный прикипать к поверхности нагрева. Поэтому железо тщательно удаляют до поступления воды в паровые котлы.

Соединения кремния присутствуют во всех природных водах в растворенном и коллоидном состояниях. Эти соединения становятся особенно вредными примесями воды в связи с широким внедрением на электростанциях котлов высокого и сверхвысокого давлений, так как при этих давлениях кремниевая кислота обнаруживает склонность к преимущественному переходу в пар и отложению на лопатках турбин.

Все природные воды содержат также и газы, среди которых следует особо отметить кислород[1] и углекислый газ, вызывающие коррозию металла. Поэтому дегазация является обязательной стадией обработки питательной воды паровых котлов.

[1] Кислород попадает в воду из атмосферы.

2-2. Основные показатели качества воды

а) Щелочность

Щелочностью называется общее содержание в ней веществ, обусловливающих при диссоциации или в результате гидролиза повышенную концентрацию ионов OH^-. В природных водах щелочность обычно обусловливается присутствием в них ионов HCO_3^-, SiO_3^{2-}, $HSiO_3^-$ и реже CO_3^{2-}, а также присутствием солей некоторых слабых органических кислот, называемых гуматами. В умягченных и котловых водах, кроме перечисленных веществ, щелочность обусловливается также ионами PO_4^{3-} и OH^-. В зависимости от того, какой анион присутствует в воде — HCO_3^-, CO_3^{2-} или OH^- — щелочность называют соответственно бикарбонатной $Щ_б$, карбонатной $Щ_к$ или гидратной $Щ_г$.

На практике часто бывает необходимым знать, какие именно из указанных последних трех щелочных ионов и в каком количестве присутствуют в данной воде. Для этого титруют пробу воды в присутствии индикатора фенолфталеина. Количество кислоты, израсходованное на титрование, характеризует щелочность воды „по фенолфталеину" $Щ_ф$. После этого в эту же пробу прибавляют несколько капель другого индикатора—метилоранжа и продолжают титрование. Общее количество кислоты, затраченное на титрование с обоими индикаторами, дает щелочность „по метилоранжу" $Щ_м$, которая будет равна общей $Щ_м = Щ_о$. При таком определении и в случае присутствия в воде только ионов CO_3^{2-}, HCO_3^- и OH^- могут быть следующие три случая, которым соответствуют определенные вид и величина щелочности:

1) $2Щ_ф > Щ_м$. При этом: $Щ_г = 2Щ_ф - Щ_м$; $Щ_к = 2(Щ_м - Щ_ф)$; $Щ_б$ нет.

2) $2Щ_ф = Щ_м$. При этом: $Щ_г$ нет; $Щ_к = 2Щ_ф$; $Щ_б$ нет.

3) $2Щ_ф < Щ_м$. При этом: $Щ_г$ нет; $Щ_к = 2Щ_ф$; $Щ_б = Щ_м - 2Щ_ф$.

Таким образом, общая щелочность воды определяется *количеством затраченной на титрование кислоты с индикатором метилоранжом* и, следовательно, будет обусловливаться не только ионами HCO_3^-, CO_3^{2-} и OH^-, но и другими, которые реагируют с кислотой, в том числе и гуматами. Так, например, щелочность котловых

вод обусловливается соединениями NaOH, Na_2CO_3, Na_3PO_4 и Na_2SiO_3, так как при титровании кислотой

$$Na_3PO_4 + 2HCl \rightarrow NaH_2PO_4 + 2NaCl;$$
$$Na_2SiO_3 + HCl \rightarrow NaHSiO_3 + NaCl.$$

б) Жесткость

Жесткостью воды H_o называется суммарное содержание в воде катионов кальция и магния, выраженное количеством миллиграмм-эквивалентов в 1 *л* (*мг/экв/л*), микрограмм-эквивалентов в 1 *л* (*мкг-экв/л*) и грамм-эквивалентов в 1 $м^3$ (*г-экв/м*^{3}). До 1952 г. жесткость измерялась градусами жесткости. Соотношения между различными единицами измерения жесткости определяются следующими цифрами

Градус жесткости	*мг-экв/л*	*мкг-экв/л*
1	0,357	357
2,8	1	1 000
0,0028	0,001	1

По относительной величине жесткости и щелочности природные воды можно разделить на две группы: *нещелочные и щелочные*. Первые характеризуются неравенством $H_o > Щ_o$, вторые — $H_o < Щ_o$. В водах первой группы, которые встречаются более часто, различают жесткость *общую* H_o, *карбонатную* $H_к$, *некарбонатную* $H_{нк}$, *кальциевую* H_{Ca} и *магниевую* H_{Mg}. Между ними имеет место следующее соотношение:

$$H_o = H_к + H_{нк} = H_{Ca} + H_{Mg}. \qquad (2\text{-}1)$$

Карбонатная жесткость обусловливается присутствующими в воде бикарбонатами кальция и магния; некарбонатную жесткость образуют хлориды и сульфаты кальция и магния, кальциевую жесткость составляют соединения кальция, магниевую — соединения магния.

Для вод второй группы понятия карбонатной и некарбонатной жесткости теряют смысл, поскольку $[HCO_3^-] > H_o$. Для этих вод следует различать жесткость общую, кальциевую, магниевую, а также щелочность. При расчетах процессов умягчения воды осадителями как внутри, так и вне котла, а также и других процессов водообработки

для щелочных вод условно следует принимать $H_к = H_о$ и $H_{нк} = 0$, учитывая избыточную концентрацию ионов HCO_3^-. Мягкие воды (химически обработанная, питательная, конденсат и т. п.) обладают лишь общей или остаточной жесткостью $H_о$. Следует обратить внимание на то, что присутствие в воде соединений натрия не придает ей жесткость.

Высокая жесткость воды приносит в быту ряд неудобств. Известно, например, что мыло в жесткой воде сворачивается и не дает обильной пены, обычной при употреблении сравнительно мягких вод.

Мыло представляет собой натриевые соли высших жирных кислот, как например, олеиновой $C_{17}H_{35}COOH$. В жесткой воде происходит реакция

$$2C_{17}H_{35}COONa + Ca^{2+} \rightarrow \downarrow Ca(C_{17}H_{35}COO)_2 + 2Na^+$$

с образованием труднорастворимого олеата кальция или магния, выпадающих в осадок. Следовательно, в первый период мыло расходуется на умягчение жесткой воды, чем и объясняется плохой моющий эффект жестких вод. На осаждение кальция и магния бесполезно расходуется мыло в количестве примерно 1 *г* на 1 *мг-экв/л* жесткости. При стирке тканей в жесткой воде труднорастворимые соли жирных кислот выпадают частично на волокнах, делая их со временем хрупкими.

в) Сухой остаток

Сухим остатком воды называется суммарное количество нелетучих веществ, присутствующих в воде в коллоидном и молекулярно-дисперсном состоянии, выраженное в мг/л или г/м³.

Сухой остаток определяют путем осторожного выпаривания профильтрованной пробы воды и последующего высушивания сухих веществ при 110—120° С. Количество этих веществ, определенное взвешиванием и пересчитанное на 1 *л* воды, и дает сухой остаток. Следовательно, в понятие сухого остатка не входят растворенные в воде газы, а также летучие (например, NH_3) и взвешенные вещества.

При определении сухого остатка природных вод бикарбонаты кальция и магния 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 вес его уменьшится и получится прокаленный остаток. Уменьшение веса происходит за счет удаления (сгорания) органических веществ, улетучивания остатков влаги, частичного разложения карбонатов и аналогичных процессов.

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

г) Окисляемость

Окисляемость в некоторой мере характеризует загрязненность воды органическими веществами. Она обычно выражается количеством миллиграммов кислорода, потребных для окисления в определенных условиях органических веществ, содержащихся в 1 *л* исследуемой воды, и обозначается *мг/л* O_2. Окисляемость не отвечает (неидентична) содержанию в воде органических веществ, так как при условиях ее определения не происходит полного разрушения (окисления) всех органических веществ.

д) Прозрачность

Прозрачность косвенно характеризует количество содержащихся в воде взвешенных веществ. Она выражается в сантиметрах высоты столба воды, налитой в специальный стеклянный цилиндр, сквозь который (столб) еще возможно чтение печатного шрифта (прозрачность по шрифту) или наблюдение крестообразно расположенных черных полосок толщиной в 1 *мм* на белом матовом кружке на дне цилиндра (прозрачность по кресту). Прозрачность лишь приблизительно характеризует концентрацию взвешенных веществ, которая при точных анализах должна определяться весовым методом.

2-3. 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; сточные воды промышленных предприятий и населенных пунктов.

Для большинства рек химический состав воды сильно зависит от гидрометеорологических условий и времени года, так как 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 торфянистые или болотные почвы, она обогащается большим количеством органических веществ и лишь в малой степени минеральными веществами. Черноземные и каштановые почвы, особенно солонцеватые, наоборот, обогащают воду преимущественно минеральными веществами.

Породы, подстилающие почву, в еще большей степени влияют на формирование состава воды, входящей с ними в контакт при просачивании сквозь почву. Они обогащают воду минеральными веществами, в том числе и накипеобразователями.

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 воды за счет 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 маломинерализованы. В засушливых районах, наоборот, почвы отличаются значительным содержанием легкорастворимых солей, что и обусловливает образование вод с высоким сухим остатком. Вот почему минерализация речной воды увеличивается на большей части европейской территории СССР с севера на юго-восток, а на азиатской территории — с севера на юго-запад.

По величине минерального остатка речные воды можно условно разделить на следующие группы:

малая минерализация	до 200 *мг/л*
средняя минерализация	200 — 250 *мг/л*
повышенная минерализация	500 — 1 000 *мг/л*
высокая минерализация	Больше 1 000 *мг/л*

Большинство рек СССР имеет малую и среднюю величину минерализации.

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 увеличиваются вследствие смывания их водой с верхнего покрова почвы.

Величина окисляемости речных вод весьма разнообразна и колеблется в пределах от 2—3 *мг/л* O_2 до 30 *мг/л* O_2 и выше. Наибольшие величины окисляемости имеют воды, содержащие органические веще-

ства гумусового происхождения, т. е. вещества, вымываемые водой из почв, торфяников, лесного перегноя и т. п. Поэтому реки севера, богатые гумусовыми веществами, отличаются и наибольшей окисляемостью.

Кроме весеннего, может быть осенний паводок, а для рек с горно-снеговым или ледниковым питанием—также и летний. В послепаводковый период минерализация воды постепенно возрастает и достигает максимума в зимний период, когда доля грунтового питания реки становится преобладающей. Сезонные изменения качества воды поверхностных источников необходимо учитывать при проектировании водоподготовительных установок.

Состав подземных вод в значительно меньшей степени, чем поверхностных, зависит от гидрометеорологических условий. Подземные воды отличаются более повышенной минерализацией, почти полным отсутствием взвешенных веществ и повышенным содержанием свободной углекислоты.

Наиболее заметно гидрометеорологические условия влияют на состав грунтовых вод, залегающих неглубоко (выше первого водоупорного слоя). Минерализация этих вод зависит от климатических условий, особенно от количества выпадающих осадков. 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 величину минерализации. Это зависит от многих условий: климата (влажный или сухой), величины притока в водоем речной воды и ее качества, величины стока воды из водоема, количества испаряющейся из него воды.

Рассмотрим изменение концентрации растворенных в воде водохранилища веществ за некоторый период времени, например за год. Для этого введем следующие обозначения:

Q_0, Q_1 — количество воды в водохранилище в начале и в конце рассматриваемого периода, $м^3$;

S_0, S_1 — средняя концентрация растворенных веществ в начале и конце периода, $мг/л$;

Δq_n — суммарный приток воды в водохранилище, $м^3$;

$\Delta q_{ст}$ — суммарный сток из него, $м^3$;

S_n, $S_{ст}$ — средняя концентрация веществ в воде притока и стока, $мг/л$.

Очевидно, в конце года количество растворенных веществ в водохранилище будет равно:

$$S_1Q_1 = S_0Q_0 + \Delta q_n S_n - \Delta q_{ст}\, S_{ст}\,.$$

Если считать, что в конце года $Q_1 = Q_0$ и иметь в виду, что

$$\Delta q_n = \Delta q_{ст} + \Delta q_{исп},$$

где $\Delta q_{исп}$ — количество воды, потерянной на испарение, можем написать:

$$S_1 = S_0 + \frac{\Delta q_{исп} S_n - \Delta q_{ст} (S_{ст} - S_n)}{Q_0}.$$

Это значит, что в водохранилище или озере минерализация воды будет нарастать с увеличением $\Delta q_{исп}$ и S_n и уменьшаться с ростом $\Delta q_{ст}$. В условиях сухого климата величины $\Delta q_{исп}$ и S_n значительны, что и обусловливает увеличение минерального остатка воды.

Воды морей и океанов отличаются весьма высокой минерализацией. Сухой остаток воды открытого океана достигает 35 000—37 000 *мг/л*. Отдельные моря под влиянием впадающих в них рек имеют меньшую минерализацию. Так, например, минерализация воды Балтийского моря достигает (в *мг/л*) 8 000, Черного — 17 000—18 000, Азовского — 11 000—12 000, Аральского — 10 000—12 000. При этом основными ионами в воде океанов являются натрий (30%) и хлор (55%).

Общее количество воды на земле оценивается в 2 млрд. *км*³. Около $^3/_5$ этого количества сосредоточено в морях и океанах. Из пресных вод земной поверхности около 25 млн. *км*³ падает на ледяные массы континентов (Антарктики, Гренландии и др.). Реки и почвенные воды вместе составляют около 0,25 млн. *км*³ и столько же приходится на долю озер. Атмосфера содержит около 0,13 млн. *км*³ воды в виде пара.

В результате испарения громадные количества воды постоянно переходят в атмосферу. Помимо прямого парообразования с водной поверхности океанов, рек и других водоемов, в этом процессе участвует и растительный мир земли. Например, взрослая береза извлекает корнями из почвы и испаряет с поверхности листьев до 700 *л* воды в сутки.

По всему земному шару ежегодно испаряется примерно 0,38 млн. *км*³ воды и выпадает такое количество осадков, которое соответствует покрывающему весь земной шар слою воды толщиной 74 *см*.

Глава третья

ОБРАЗОВАНИЕ ОТЛОЖЕНИЙ В ПАРОВЫХ КОТЛАХ И ТЕПЛООБМЕННИКАХ И ИХ ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ

3-1. Образование отложений в паровых котлах

а) Барабанные котлы

В результате нагревания в котловой воде протекают различные физико-химические процессы, обусловливающие 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 называются достаточно плотные отложения, возникшие на поверхности нагрева или охлаждения из воды или под ее воздействием и способные нарушать нормальную работу котла или теплообменника. Рыхлые отложения, получающиеся в результате оседания, скопления и уплотнения взвешенных веществ, содержащихся в воде, называются шламовыми или просто шламом [1]. Накипные и шламовые отложения в равной мере опасны для работы паровых котлов.

В образовании труднорастворимых соединений важную роль играют следующие процессы:

Термический распад бикарбоната кальция по реакции:

$$Ca(HCO_3)_2 \rightarrow \downarrow CaCO_3 + \uparrow CO_2 + H_2O \qquad (3\text{-}1)$$

с образованием труднорастворимого $CaCO_3$ и летучей CO_2.

Этот процесс имеет место в исходных водах, обладающих повышенной и высокой карбонатной жесткостью. Он протекает при нагревании воды или при удалении растворенного в ней углекислого газа, что происходит, например, при разбрызгивании воды на открытом воздухе. Наоборот, обогащение воды CO_2 путем, например, продувания сквозь нее газа, содержащего углекислоту, сдвигает процесс в обратную сторону

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \rightarrow Ca(HCO_3)_2.$$

Это приводит к прекращению образования карбонатной накипи или даже к растворению уже выпавшего $CaCO_3$, если в воду вводится достаточное количество углекислоты. Этот способ, известный под названием *рекарбонизации* воды, широко используется на практике для предотвращения накипеобразования в конденсаторах паровых турбин. Процесс термического распада бикарбонатов кальция является основным при образовании накипи в разного рода теплообменных аппаратах, в которых используется исходная вода с высокой карбонатной жесткостью в качестве охлаждающей.

---

[1] Часто шламом называются также образующийся в воде осадок (взвесь) и илистые скопления в барабанах котлов, коллекторах экранов и в различных баках.

Протекание реакции между различными соединениями, присутствующими в котловой воде. В последней присутствуют различные ионы. Реакции между ними происходят в том случае, если в результате образуются труднорастворимые, слабодиссоциирующие или летучие (газообразные) вещества. Если в котловой воде 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 можно ожидать образования одного или нескольких из труднорастворимых соединений, как-то:

$$CaCO_3,\ CaSO_4,\ CaSiO_3,\ Ca_3(PO_4)_2,$$
$$Mg(OH)_2,\ MgSiO_3,\ Mg_3(PO_4)_2.$$

Образование труднорастворимых веществ, являющихся первопричиной возникновения накипных или шламовых отложений, становится возможным лишь при наличии некоторых определенных условий. Одно из них должно удовлетворять требованию весьма важного *правила произведения растворимости*, сущность которого состоит в следующем.

Если через KA обозначить труднорастворимое соединение (соль), в котором K означает катион, а A — анион, то для насыщенного раствора этого соединения имеет место следующее равенство:

$$[K^+][A^-] = ПР = \text{const}, \qquad (3\text{-}2)$$

которое оказывается достаточно точным только для сравнительно разбавленных растворов. Здесь $[K^+]$ и $[A^-]$ обозначают концентрацию соответственно катиона и аниона, выраженную количеством грамм-ионов в 1 *л* (*г-ион/л*). Физический смысл равенства (3-2) заключается в том, что в насыщенном растворе труднорастворимого вещества произведение концентраций находящихся в растворе ионов, из которых это вещество состоит, при данной температуре есть величина постоянная, равная произведению растворимости $ПР$. Следовательно, если $[K^+][A^-] < ПР$ — раствор не насыщен и осадок выпадать не будет; при $[K^+][A^-] > ПР$ — выпадение осадка, вообще говоря, оказывается неизбежным. Численное значение величины $ПР$ неодинаково для различных труднорастворимых соединений и для данного вещества зависит от температуры раствора. Если труднорастворимое вещество имеет формулу K_nA_m, то равенство (3-2) примет вид:

$$[K^+]^n[A^-]^m = ПР.$$

Например, для $Ca(OH)_2$ следует написать:

$$[Ca^{2+}][OH^-]^2 = ПР,$$

а для $CaCO_3$

$$[Ca^{2+}][CO_3^{2-}] = ПР.$$

Следует обратить внимание на то, что согласно правилу произведения растворимости для образования осадка, например $CaCO_3$, совсем необязательна высокая концентрация в растворе иона кальция. Осадок может образоваться и при малом значении $[Ca^{2+}]$,

т. е. при малой жесткости раствора, если концентрация иона $[CO_3^{2-}]$ будет столь большой, что произведение $[Ca^{2+}][CO_3^{2-}]$ превысит величину *ПР* для данной температуры.

Руководствуясь закономерностями, вытекающими из правила произведения растворимости, можно предвидеть результат взаимодействия нескольких ионов или создать условия, при которых это взаимодействие будет идти в необходимом направлении. Например, из двух соединений кальция $CaCO_3$ и $CaSO_4$ менее вредным будет образование в котле первого. Это будет иметь место при условии, что

$$[Ca^{2+}] < \frac{ПР_{CaSO_4}}{[SO_4^{2-}]}, \qquad (3\text{-}3)$$

или, имея в виду, что при выделении в осадок $CaCO_3$

$$[Ca^{2+}] = \frac{ПР_{CaCO_3}}{[CO_3^{2-}]}, \qquad (3\text{-}4)$$

условие (3-3) примет вид:

$$\frac{ПР_{CaCO_3}}{[CO_3^{2-}]} < \frac{ПР_{CaSO_4}}{[SO_4^{2-}]}, \qquad (3\text{-}5)$$

откуда концентрация иона CO_3^{2-} будет равна:

$$[CO_3^{2-}] > \frac{ПР_{CaCO_3}}{ПР_{CaSO_4}}[SO_4^{2-}].$$

Если соотношение концентраций ионов CO_3^{2-} и SO_4^{2-} в котловой воде удовлетворяет этому неравенству, образование сульфата кальция не будет иметь места.

Понижение растворимости солей, обладающих отрицательным коэффициентом растворимости, с повышением температуры воды.

Повышение концентрации солей в испаряемой воде вследствие ее упаривания. Обозначим концентрацию какого-либо вещества в котловой воде спустя t [*ч*] с момента пуска котла (без продувки) через $C_{кв}^{t}$, а в питательной воде и паре через $C_{пв}$ и $C_{п}$ [*мг/л*]. Можем написать следующую зависимость, устанавливающую закономерность нарастания концентрации веществ в котловой воде:

$$C_{кв}^{t} = C_{пв} + \frac{D_{п}}{V_{к}} t\,(C_{пв} - C_{п})\ [мг/л]. \qquad (3\text{-}6)$$

Здесь $D_п$ и $V_к$ соответственно обозначают паропроизводительность котла, $т/ч$ и его водяной объем, $м^3$. Скорость нарастания $C_{кв}$, очевидно, зависит от величины отношения $D_п : V_к$, которая для современных котлов достигает $3 \div 4$.

Увеличение $C_{кв}$ не происходит беспредельно, так как, начиная с некоторого момента времени, величина $C_п$, в свою очередь, начинает возрастать с ростом t, и, следовательно, разность $(C_{пв} - C_п)$ уменьшается. Однако если рассматривать отрезок времени, для которого $C_{пв} \gg C_п$, то можно принять $C_п = 0$, и тогда равенство (3-6) примет более простой вид:

$$C^t_{кв} = C_{пв}\left(1 + \frac{D_п}{V_к}\, t\right). \qquad (3\text{-}6а)$$

Величина

$$N = \frac{C^t_{кв}}{C_{пв}} = 1 + \frac{D_п}{V_к}\, t \qquad (3\text{-}7)$$

называется степенью (кратностью) упаривания котловой воды. Она показывает, во сколько раз концентрация солей в котловой воде становится больше, чем в питательной. Для современных котлов N изменяется от 20 до 200.

Следует иметь в виду, что величина N определяет среднее значение кратности упаривания, относящееся ко всему объему котловой воды. В действительности же в водяном объеме работающего котла могут существовать отдельные места, где кратность упаривания будет значительно больше, чем N. Такие места обычно возникают в теплонапряженных трубах с вялой или нарушенной циркуляцией.

Рассмотрим баланс шламо- и накипеобразующих веществ, если они содержатся в питательной воде и поступают в котел. В этом случае в единицу времени в котел поступает этих веществ

$$g_1 = D_{пв} C_{пв} \ [г/ч].$$

Удаляется из котла с продувочной водой $g_2 = p_п D_п C_{кв}$ и с паром $g_3 = D_п C_п$ $[г/ч]$. Здесь $D_{пв}$ обозначает количество питательной воды, $т/ч$, а $p_п$ — количество воды, удаляемое из котла, в долях от $D_п$. Если $g_1 > g_2 + g_3$, то в котле остается осадок в количестве

$$g = g_1 - g_2 - g_3 = D_{пв}\, C_{пв} - p_п D_п\, C_{кв} - D_п C_п.$$

Заменяя $D_{пв} = D_п + p_п D_п$ и сокращая на $D_п$, получим количество осадка, отнесенное к 1 $т$ пара:

$$\Delta g = C_{пв} - p_п (C_{кв} - C_{пв}) - C_п \ [г/т].$$

При нормальном качестве пара можно принять $C_п = 0$. Тогда безнакипный режим работы котла будет определяться условием

$$\frac{C_{пв}}{C_{кв}} = \frac{p_п}{1 + p_п}. \tag{3-8}$$

Отложение в котле, например, сульфатов (SO_4^{2-}), силикатов (SiO_3^{2-}) не будет иметь места, если отношение их концентраций в питательной и котловой воде будет удовлетворять условию

$$\frac{C_{пв}}{C_{кв}} = \frac{(SO_4^{2-})_{пв}}{(SO_4^{2-})_{кв}} = \frac{(SiO_3^{2-})_{пв}}{(SiO_3^{2-})_{кв}} = \frac{p_п}{1 + p_п}. \tag{3-9}$$

Неравенство (при $C_п \approx 0$ и $C_{пв} \gg C_п$):

$$\frac{C_{пв}}{C_{кв}} > \frac{p_п}{1 + p_п} \tag{3-10}$$

означает, что рассматриваемое вещество накапливается в котле в виде осадка или претерпевает разложение с образованием летучего соединения, уходящего с паром.

Выпадение из раствора твердой фазы (кристаллизация) может происходить непосредственно на поверхности нагрева или охлаждения. Такое явление называется первичным процессом накипеобразования, в результате которого возникают обычно твердые накипные отложения. Вторичный процесс накипеобразования характеризуется тем, что осадки вначале выпадают в толще воды в виде взвешенных частиц, которые в последующем образуют прочно сцепленные с поверхностью вторичные отложения. Последние отличаются обычно заметно меньшей твердостью, чем первичные, почему их часто рассматривают как шламовые.

б) Прямоточные котлы

Все нелетучие твердые вещества, поступающие с питательной водой в прямоточный бессепараторный котел, могут оставаться в нем в виде накипи или уноситься паром в турбину. При давлениях, больших 80 *ата*, пар приобретает способность растворять соли, которая возрастает с увеличением давления. Поэтому с ростом растворяющей способности будет увеличиваться и доля солей, выносимых паром из котла.

Обеспечение безнакипного режима работы прямоточ-

ных котлов и отсутствия отложений в проточной части турбин может быть достигнуто путем питания котлов водой, содержащей минимальное количество солей. На практике прямоточные котлы питаются турбинным конденсатом с небольшой добавкой дистиллята. В связи с этим водяная плотность конденсаторов турбин является основным фактором, определяющим возможность образования отложений в котлах и турбинах.

Развитие котельной техники в настоящее время идет по пути увеличения температуры и давления пара и единичной мощности котлоагрегатов. С ростом давления уменьшается разность удельных весов воды γ' и пара γ'', а вместе с этим и движущий циркуляционный напор. Ввиду этого при критическом и сверхкритическом давлениях пара могут быть применены только прямоточные бессепараторные котлы, которые будут господствовать на электростанциях недалекого будущего.

Образование отложений в прямоточном котле зависит от содержания нелетучих веществ в питательной воде и растворимости их в насыщенном и перегретом паре. Предотвращение отложений в прямоточных котлах возможно, если концентрация веществ в питательной воде будет меньше их растворимости в насыщенном и перегретом паре. Как показывает опыт, соблюдение этого условия не всегда возможно.

Из двух возможных мест выделения солей из парового раствора—котел и турбина—выбирают котел, который допускает накопление в нем некоторого количества отложений без снижения надежности и экономичности работы. По данным опыта считается возможным образование отложений в прямоточном котле в количестве 25—30 *кг* на каждые 100 *т/ч* его производительности. Наоборот, занос проточной части турбин является недопустимым. В блочной схеме с прямоточным котлом стремятся котел превратить в своего рода ловушку для солей, предохраняя тем самым турбину от заноса.

Интенсивность образования отложений в котле не будет при этом значительной. Если принять солесодержание питательной воды 0,2 *мг/л*, производительность котла 100 *т/ч* и долю выноса солей из котла 15%, то накопление в котле 30 *кг* отложений будет достигнуто примерно через 1 750 *ч*. Практически же можно обеспечить количество солей в питательной воде заметно меньше.

Отложения в прямоточном котле образуются в переходной зоне и перегревателе.

3-2. Количество, состав и свойства отложений

Количество ($B_р$), вносимых в котел накипе- и шламообразующих веществ за t [*ч*], может быть определено по формуле

$$B_р = \frac{C_{пв}\, Э_к\, D_{пв}\, t}{10^3}\ [кг], \qquad (3\text{-}11)$$

в которой $C_{пв}$ обозначает концентрацию в *мг-экв/л* накипе- и шламообразователей в питательной воде, в частности жесткость питательной воды, а $Э_к$ — численное значение эквивалента для рассматриваемого соединения или средняя его величина для суммы веществ.

Вскрытие барабанного котла и чистка его внутренних поверхностей нагрева производятся обычно раз в год. Следовательно, величина t равна 7 000 — 8 000 *ч*. Поэтому даже при малых $C_{пв}$ получаются большие значения $B_р$, особенно для котлов большой производительности. Барабанный котел, таким образом, по отношению к накипе- и шламообразователям является как бы суммирующим аппаратом: даже малые их концентрации в питательной воде могут привести к образованию в котле больших отложений. Опыт эксплуатации показывает, однако, что не все вещества, проникающие в котел, остаются в нем в виде шлама или накипи. Часть их, часто значительно большая, выводится из котла с продувочной водой.

Поэтому количество остающихся в котле веществ в виде накипи и шлама можно было бы охарактеризовать некоторым коэффициентом загрязнения поверхности нагрева φ, который будет равен:

$$\varphi = \frac{g}{g_1} = 1 - \frac{p_п\, C_{кв} + C_п}{(1+p)\, C_{пв}}\,. \qquad (3\text{-}12)$$

При $\varphi = 1$ все вносимые в котел шламо- и накипеобразующие вещества остаются в нем и загрязнение котла будет максимальным, что на практике, однако, не имеет места, так как $\varphi < 1$. Условие $\varphi = 0$ отвечает безнакипному состоянию поверхностей нагрева котла. В действительности $0 < \varphi < 1$. На величину φ влияют многие факторы: свойства шлама, режим периодической продувки котла, концентрация шлама в котловой воде и др. По некоторым ограниченным эксплуатационным данным можно отметить, что в лучших случаях φ не превышает 4 — 5%, хотя может достигать и бóльших значений.

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 содержание в них в процентах CaO, MgO, CuO, SO_3, SiO_2, Fe_2O_3, Al_2O_3, P_2O_5, а также количество летучих соединений, даваемое под рубрикой «потери при прокаливании».

Химический состав накипей, образующихся в паровых котлах, весьма разнообразен. Однако они могут быть разделены на две группы: накипи с преобладанием накипеобразователей CaO и MgO, и накипи, содержащие их в пределах нескольких процентов. Первая группа относится к разряду обычных накипей, которые возникают при питании котлов недостаточно умягченной водой или при нарушении режима внутрикотловой обработки. Образование накипей второй группы, так называемых «бескальциевых», происходит при глубоком упаривании котловой воды в паропроизводящих трубах котла. Обычно в современных котлах это происходит при нарушении циркуляции, при котором в трубе образуется свободный уровень. Котловая вода периодически омывает стенку теплонапряженной трубы и глубоко упаривается. В составе образующихся при этом силикатных накипей преобладают Na_2O, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3.

Накипи первой группы в свою очередь могут быть разделены на подгруппы по преобладанию в них того или другого соединения. Различают накипи: *карбонатные* с преобладанием $CaCO_3$, *сульфатные* с содержанием $CaSO_4$ до 40—50%, *силикатные и смешанные.*

В отложениях, возникающих в современных котлах, питающихся глубоко умягченной водой, часто присутствуют окислы железа и меди. Встречаются отложения, на 70—80% состоящие из окислов железа. В котлах высокого и сверхвысокого давлений отмечается образование отложений, состоящих преимущественно из магнетита Fe_3O_4 и весьма мало теплопроводных. Окислы железа и меди наносятся в котлы питательной водой, в которую они попадают в основном в результате коррозии металла водо-конденсатного тракта станции.

Для эксплуатации весьма важно знать состав отложений, так как он позволяет вскрыть причину их образования и внести необходимые исправления в водный режим котла. Химический анализ позволяет узнать род окислов и их относительное количество. Однако он не дает определенных указаний на то, какие именно конкретные

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.

Наиболее важным свойством накипных отложений является их теплопроводность, которая изменяется в широких пределах в зависимости от структуры и пористости отложений. Отдельные виды накипей характеризуются следующей величиной коэффициента теплопроводности:

	ккал/м·ч·град
Накипь, загрязненная маслом	0,1
Силикатная накипь	0,07—0,2
Гипсовая накипь	0,2—2,0
Карбонат кальция аморфный	0,2—1,0

Непосредственным результатом образования накипи является повышение температуры стенки $t_{ст}$ кипятильной или экранной трубы, которая может быть найдена по следующей приближенной формуле:

$$t_{ст} = t_{ном} + \frac{q}{\alpha_2}\beta + \frac{q}{1000}\frac{s}{\lambda}\frac{\beta}{\beta+1} + q\frac{\delta_н}{\lambda_н}, \qquad (3\text{-}13)$$

где $t_{ном}$ — температура насыщения, соответствующая давлению в котле, °С;

q — теплонапряжение поверхности нагрева, *ккал/м²·ч*;

α_2 — коэффициент теплоотдачи от стенки трубы к протекающей по трубе среде, *ккал/м²·ч·град*;

β — отношение наружного диаметра трубы к внутреннему;

$S, \delta_н$ — толщина стенки трубы, *мм* и накипи, *м*;

$\lambda, \lambda_н$ — коэффициент теплопроводности металла и накипи, *ккал/м·ч·град*

Результаты расчетов по этой формуле приведены на рис. 3-1, из которого следует, что накипи с малой теплопроводностью создают опасный перегрев металла при высоком q уже при толщине всего в 0,1 *мм*. При этом с увеличением давления допустимая толщина накипи уменьшается.

3-3. Методы борьбы с отложениями в паровых котлах

а) Барабанные котлы

Для предотвращения образования в котлах накипи и шлама применяют следующие меры:

а) глубокое умягчение добавляемой в питательную систему котлов воды;

б) предотвращение загрязнений питательной воды продуктами коррозии металлов;

в) устранение присосов охлаждающей воды в конденсаторах турбин;

г) организация внутрикотловой (коррекционной) обработки воды.

Методы умягчения воды и предотвращения обогащения питательной воды продуктами коррозии будут рассмотрены позже. Здесь следует только отметить, что во многих случаях при умягчении воды не удается полностью уда-

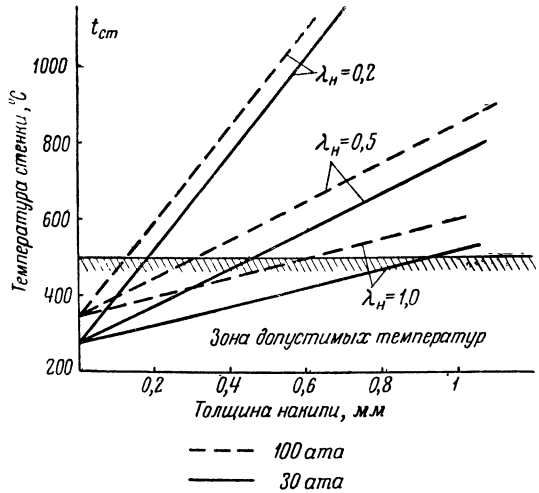


Рис. 3-1. Зависимость температуры стенки трубы от толщины слоя отложений при $q = 250\,000$ *ккал/м²·ч*.

лить из нее накипеобразователи. Остаточная жесткость умягченной воды все еще составляет порядка 3—7 *мкг-экв/л*, а нередко и выше.

Насколько велико количество накипеобразующих веществ, попадающее в котел при жесткости питательной воды 5 *мкг-экв/л*, можно видеть из следующего примера. Примем производительность котла $D_п = 200$ *т/ч*, длительность работы его без очистки 8 000 *ч* и коэффициент загрязнения $\varphi = 0{,}1$. Тогда, воспользовавшись формулой (3-11), получим при $Э_к = 50$ $B_р = 40$ *кг*. Этого количества достаточно, чтобы на 200 — 300 *м²* экранных поверхностей котла образовался слой отложений толщиной 0,1 *мм*, который способен при некоторых условиях вызвать опасный перегрев металла.

Попадание охлаждающей воды в междутрубное пространство конденсаторов паровых турбин называется присосом, который в той или иной мере имеет место в каждом конденсаторе, так как трудно полностью устранить не-

плотности в местах сочленения трубок с трубными досками. Величина присоса ω, выраженная в процентах от количества поступающего в конденсатор пара, определяется формулой

$$\omega = \frac{C_к - C_п}{C_{ов} - C_п} 100\%,$$

где $C_к$, $C_п$, $C_{ов}$ — концентрация какого-либо соединения соответственно в конденсате, паре и охлаждающей воде.

Для контроля величины ω на практике чаще всего используют величину жесткости указанных составляющих.

Внутрикотловая или коррекционная обработка воды имеет своей целью обезвредить попавшие в котел накипеобразователи и основана на следующих соображениях. Поступающие в котел катионы Ca^{2+} и Mg^{2+} способны давать труднорастворимые соединения с различными присутствующими в котловой воде анионами. Эти соединения по-разному ведут себя в условиях котловой воды. Одни из них ($CaSO_4$, $CaSiO_3$) выделяются из раствора главным образом на поверхности нагрева в виде накипи. Другие [$CaCO_3$, $3Ca_3(PO_4)_2 \cdot Ca(OH)$], наоборот, выделяются преимущественно в форме взвеси, образующей неприкипающий осадок (шлам), легко удаляемый из котла продувкой. *Поэтому на практике стремятся создать в котловой воде такие условия, при которых накипеобразователи выделялись бы в форме неприкипающего шлама.* Практически это достигается тем, что в котловой воде создают и непрерывно поддерживают определенную концентрацию ионов CO_3^{2-} и OH^- (щелочной режим) или PO_4^{3-} и OH^- (фосфатный режим) путем ввода в котел реагентов NaOH, Na_2CO_3 или тринатрийфосфата Na_3PO_4.

При щелочном режиме попадающие в котел накипеобразователи выпадают в виде $CaCO_3$ и $Mg(OH)_2$. Карбонат кальция в нещелочной среде (например, в конденсаторах турбин) выделяется на поверхности нагрева с образованием плотной накипи. В условиях щелочной котловой воды он выпадает в форме неприкипающего шлама.

Для получения удовлетворительных результатов при этом режиме необходимо поддерживать определенную ще-

лочность котловой воды $Щ_{кв}$. Для этого в процессе работы котла в него вводят щелочные реагенты в количестве, которое определяется следующей формулой:

$$A = [H_{нк}(1 + p_п) + p_п Щ_{кв}] D_п Э_к \cdot 10^{-3} \ [кг/ч]. \quad (3\text{-}14)$$

Если котел питается жесткой водой, то количество поступающих в него шламообразующих веществ будет определяться выражением

$$s_ш^{пв} = D_п(1 + p_п)(50H_{Ca} + 29H_{Mg}) \ [г/ч], \quad (3\text{-}15)$$

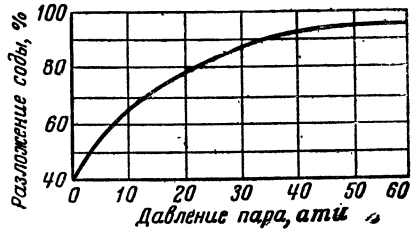


Рис. 3-2. Разложение соды в зависимости от давления.

а концентрация шлама в котловой воде будет достигать величины:

$$s_ш^{кв} = \frac{1 + p_п}{p_п}(50H_{Ca} + 29H_{Mg}) \ [мг/л]. \quad (3\text{-}16)$$

Щелочной режим котловой воды эффективен только для котлов с рабочим давлением пара до 16 *ата*. Это объясняется тем, что устойчивость карбонатного иона CO_3^{2-} зависит от температуры, с повышением которой равновесие реакции

$$CO_3^{2-} + H_2O \rightleftarrows 2OH^- + CO_2$$

сдвигается вправо (рис. 3-2), т. е. происходит разложение соды. В результате эффективность щелочного режима снижается, а пар загрязняется углекислотой. Если состав щелочности питательной воды определяется равенством $Щ_о = Щ_к + Щ_б$ (см. § 2-2), то количество переходящей в пар CO_2 будет равно:

$$(CO_2) = 22\,(Щ_б + aЩ_о) \ [мг/кг \text{ пара}],$$

где a — степень разложения соды в долях.

Загрязнение пара углекислотой весьма нежелательно, поскольку это вызывает углекислотную коррозию конденсатного тракта.

б) Прямоточные котлы

Предотвращение отложений в прямоточных котлах достигается тем, что котлы питают водой, содержащей минимальное количество нелетучих веществ ($<0{,}2$ *мг/л*). Ввиду этого задача обеспечения безнакипного состояния внутренних поверхностей прямоточного котла сводится к устранению источников загрязнения питательной воды,

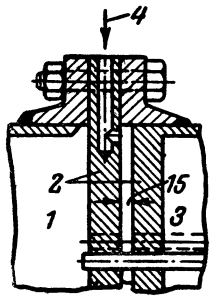


Рис. 3-3. Сдвоенная трубная доска.

1 — водяная камера; *2* — трубные доски; *3* — паровое пространство конденсатора; *4* — подача уплотняющего конденсата из напорного бачка.

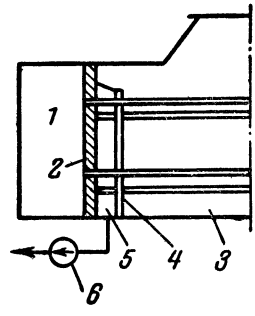


Рис. 3-4. Схема устройства „соленого отсека" в конденсаторе.

1 — водяная камера; *2* — трубная доска; *3* — паровое пространство; *4* — перегородка; *5* — соленый отсек; *6* — насос.

основным из которых являются присосы охлаждающей воды в конденсаторах турбин. Борьба с ними и составляет одну из главных задач эксплуатационного персонала электростанций, оборудованных прямоточными котлами.

Насколько сложной оказывается задача обеспечения высокой водяной плотности конденсаторов, видно из следующего:

Присосы охлаждающей воды обусловливаются неплотностями в местах соединения трубок с трубными досками. Для конденсаторов современных крупных турбин число таких соединений доходит до 25 000, а сумма периметров отверстий в трубных досках достигает 1 500 *м*. Достаточно образоваться неплотности всего на длине 25 *мм* шириной 0,01 *мм*, чтобы размер присоса достиг своего предельного значения.

Предложены различные способы достижения высокой водяной плотности конденсаторов. Один из них заключается в том, что в конденсаторах устанавливаются сдвоенные трубные доски (рис. 3-3), в которых и укрепляются трубки. Камера, образовавшаяся между

трубными досками, заполняется конденсатом, давление которого поддерживается выше давления охлаждающей воды. По второму способу высокая герметичность вальцовочных соединений может быть достигнута путем нанесения на них со стороны воды уплотняющих покрытий из металла, каучука или пластмассы. Третий способ предусматривает устройство в конденсаторах «соленых отсеков» (рис. 3-4), для чего внутри конденсатора устанавливается перегородка 2. Проникающая через неплотности охлаждающая вода будет собираться в соленом отсеке *4* и выводиться насосом *5*.

Вторым источником загрязнения питательной воды являются процессы коррозии, протекающие в водо-конденсатном тракте станции. Они обогащают воду окислами многих металлов, среди которых окислы железа являются доминирующими. Задача предотвращения загрязнения питательной воды продуктами коррозии сводится к обеспечению глубокого обескислороживания ее и проддержанию щелочной среды, что детально рассматривается ниже.

в) Фосфатирование котловой воды

Фосфатирование котловой воды является средством предупреждения образования главным образом кальциевой накипи, а не накипи вообще. Оно состоит в том, что в котловой воде поддерживается определенная концентрация свободных (не связанных с кальцием) ионов PO_4^{3-}, нижний предел которой зависит от содержания в котловой воде силикатов (SiO_3^{2-}) и сульфатов (SO_4^{2-}) в *мг/л* и определяется выражением

$$i_{\phi}^{p} = A_{\phi} + 0{,}1\,(SiO_3^{2-}) + 0{,}01\,(SO_4^{2-})\ [мг/л], \qquad (3\text{-}17)$$

где A_{ϕ} — постоянная величина, равная для котлов без ступенчатого испарения 15, и для чистых отсеков котлов со ступенчатым испарением 7.

Фактическая концентрация ионов PO_4^{3-} в котловой воде i_{ϕ}^{g} служит показателем правильности ведения фосфатного режима, величину ее целесообразно поддерживать в пределах

$$i_{\phi}^{p} < i_{\phi}^{g} < 1{,}2 i_{\phi}^{p}. \qquad (3\text{-}18)$$

Если $i_{\phi}^{g} < i_{\phi}^{p}$, фосфатный режим считается неудовлетворительным, так как при этом возможно образование накипи.

При пуске котла в работу в воде, которой он заполнен, необходимо создать начальный избыток PO_4^{3-} (если его нет), для чего в котел вводится фосфат в количестве

$$\Phi_1 = \frac{V_к i_{ф}^{p}}{10 C_{ф}} \ [кг], \qquad (3\text{-}19)$$

где $C_ф$ — содержание PO_4^{3-} в техническом продукте, %.

В процессе работы котла фосфат вводится в него непрерывно в количестве

$$\Phi_2 = \frac{100}{C_ф}[28{,}5 H_o (1 + p_п) + p_п i_{ф}^{g}] \ [г/т] \qquad (3\text{-}20)$$

пара, или

$$\Phi_3 = \frac{D_п}{10 C_ф}[28{,}5 H_o (1 + p_п) + p_п i_{ф}^{g}] \ [кг/ч], \qquad (3\text{-}21)$$

где $p_п$ — продувка котла в долях от его паропроизводительности, принятой за единицу;

H_o — остаточная жесткость питательной воды, *мг-экв/л*;

28,5 — эквивалент иона PO_4^{3-} в гидроксилапатите.

Первое слагаемое определяет полезный расход тринатрийфосфата на связывание накипеобразователей, второе — величину его потерь с продувочной водой.

Объем раствора тринатрийфосфата $V_p^{ф}$ концентрацией $C_{вп}$ [%] и удельным весом $\gamma_p^{ф}$, подаваемый в работающий котел, можно определить по формуле

$$V_p^{ф} = D_п \frac{28{,}5 H_o (1 + p_п) + p_п i_{ф}^{g}}{10 C_{вп} n \gamma_p^{ф}} \ [л/ч], \qquad (3\text{-}22)$$

где n — отношение $(PO_4^{3-}) : (Na_3PO_4) = 0{,}579$.

Тринатрийфосфат вводится в котел в виде раствора определенной концентрации. При этом он может подаваться по двум схемам: *центральной и индивидуальной*. Центральная схема (рис. 3-5) отличается тем, что раствор фосфата вводится в каком-либо месте питательного тракта до питательных насосов из расчета потребности всех работающих котлов. Эта схема проста в обслуживании и удобна

в эксплуатации. Однако применение ее не всегда возможно. Если питательная вода обладает повышенной жесткостью (>5 *мкг-экв/л*), то централизованный ввод тринатрийфосфата приводит к заносу регенеративных подогревателей высокого давления и водяных экономайзеров котлов отложениями, так как в слабощелочной среде кальций образует с ионом PO_4^{3-} трикальцийфосфат (фосфорит) $Ca_3(PO_4)_2$, склонный давать плотные вторичные отложения. Поэтому применение рассматриваемой схемы допустимо, если жесткость питательной воды меньше 5 *мкг-экв/л*.

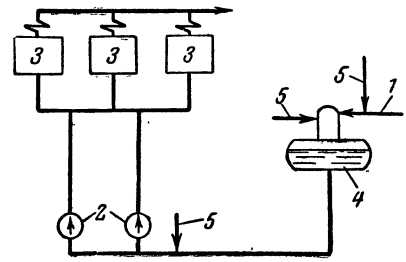


Рис. 3-5. Схема централизованного ввода фосфата в котлы.
1 — линия химически обработанной воды; *2* — питательные насосы; *3* — котлы; *4* — деаэратор; *5*—возможные места ввода фосфата.

В индивидуальной схеме раствор фосфата подается в каждый котел в отдельности и вводится непосредственно в барабан (питательная вода прямоточных котлов не фосфатируется). В качестве дозаторов широко применяют плунжерные насосы специальной конструкции, которые устанавливаются на каждый котел в отдельности (рис. 3-6,*а*), либо группой на все котлы (рис. 3-6,*б*). Каждый из этих вариантов имеет свои преимущества и недостатки и выбор должен производиться с учетом конкретных условий данной котельной.

Раствор тринатрийфосфата приготовляется в гидравлической мешалке *6* (рис. 3-6) на горячей умягченной питательной воде или конденсате. При использовании холодной воды раствор подогревают паром. Концентрация приготовляемого раствора обычно принимается в пределах 5—8%. Приготовленный (первичный) раствор фосфата пропускается насосом *5* через механический фильтр *4* и далее в расходные баки *3*, в которых он разбавляется до необходимой рабочей концентрации $C_{вп}^{р}$ [%]. Последняя зависит от производительности насоса дозатора $q_{нд}$ [*л/ч*] и расхода фосфата $Ф_з$:

$$C_{вп}^{р} = \frac{43{,}1 Ф_з}{q_{нд} \gamma_р^{ф}} [\%]. \qquad (3\text{-}23)$$

Для приготовления $V_p^{ф}$ [л] рабочего раствора концентрацией $C_{вп}^{р}$ необходимо подать в расходный бак $V_{рп}^{ф}$ [л] первичного раствора, имеющего концентрацию $C_{вп}^{п}$ [%], при этом

$$V_{рп}^{ф} = V_p^{ф} \frac{\gamma_{р2}^{ф} C_{вп}^{р}}{\gamma_{р1}^{ф} C_{вп}^{п}} \text{ [л]}, \qquad (3\text{-}24)$$

где $\gamma_{р1}^{ф}$, $\gamma_{р2}^{ф}$ — удельный вес раствора фосфата первичного и рабочего.

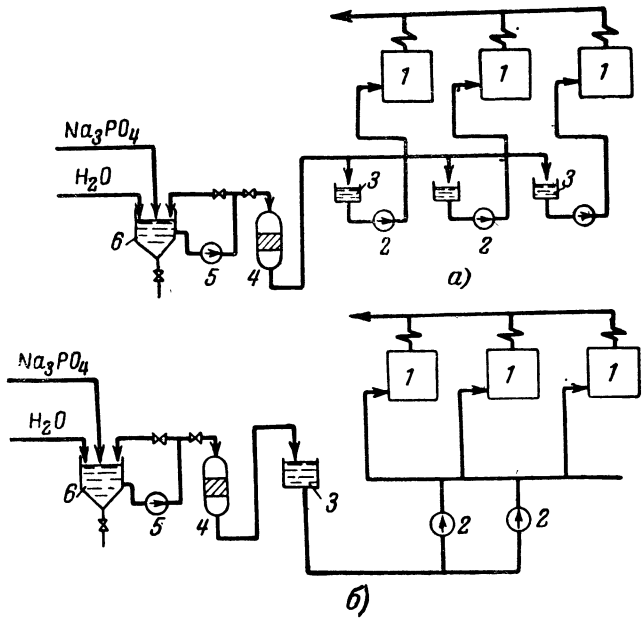


Рис. 3-6. Схемы ввода раствора фосфата в котлы при помощи насосов-дозаторов.

1 — котлы; *2* — насосы-дозаторы; *3* — расходные бачки; *4* — фильтр; *5* — перекачивающий насос; *6* — бак-мешалка для приготовления раствора фосфата.

Объем баков $V_б$ определяется по формуле

$$V_б = 1{,}3 \frac{0{,}431 \cdot \Phi_з t}{10 C_{вп} \gamma_р^{ф}} \text{ [м}^3\text{]}, \qquad (3\text{-}25)$$

где t — длительность периода между двумя последовательными приготовлениями раствора.

Нагрузку насоса дозатора целесообразно принимать не меньше 70—80% от номинальной.

3-4. Удаление образовавшихся отложений

Удаление образовавшихся в котле отложений производится двумя способами: *механическим и химическим.*

Механический способ основан на применении различных скребковых и режущих инструментов, из которых следует отметить шарошку, как наиболее часто употребляемую на практике. Она представляет собой набор фрез, насаженных на стержни, шарнирно связанные с корпусом. При чистке шарошка подается в трубу и приводится в быстрое вращение. Фрезы, отжимаемые центробежной силой к стенке трубы, срезают или соскабливают отложения, которые удаляются вниз по ходу шарошки.

Выбиваемые из трубы отложения при шарошении ее всухую (электрошарошкой) могут быть собраны и взвешены. Зная их вес (B [$г$]) и поверхность трубы ($h_{тр}$ [$м^2$]), можно определить удельную загрязненность данной трубы:

$$\sigma = B : h_{тр} \ [г/м^2]. \qquad (3\text{-}26)$$

Обычно перед чисткой поверхностей нагрева котла в капитальный ремонт производят *контрольное* шарошение (если оно вообще выполнимо). Для этого в отдельных элементах поверхности нагрева (например, фронтовом или боковом экране) намечают несколько контрольных труб, для которых и определяется значение σ. При этом поверхность нагрева данного элемента считается чистой, а шарошение его не обязательно, если для всех выбранных контрольных труб $\sigma \leqslant 20$ $г/м^2$.

Механический способ удаления отложений требует большой затраты труда и в ряде случаев оказывается неприменимым или малоэффективным.

Химический способ основан на применении растворов кислот и щелочей. Из кислот нашли применение соляная, фосфорная и хромовая. Наиболее часто употребляется соляная кислота вследствие ее большей доступности Фосфорная кислота обладает рядом преимуществ перед соляной: растворы ее не выделяют кислых паров, они менее агрессивны по отношению к металлу, после чистки металл не ржавеет. Однако она дефицитна и дороже соляной кислоты.

Наиболее эффективной кислотная промывка оказывается в случае, когда отложения состоят преимущественно из растворимых в данной кислоте веществ, например из $CaCO_3$:

$$CaCO_3 + 2HCl \rightarrow CaCl_2 + \uparrow CO_2 + H_2O.$$

Замена в этой реакции соляной кислоты серной вызывает ухудшение и даже полное прекращение растворения отложений вследствие образования труднорастворимого $CaSO_4$. Если же отложения состоят в основном (70—75%) из окислов железа, серная кислота может быть использована с успехом. Поэтому выбор кислоты и технологического режима кислотной промывки обычно производится на основе химического состава отложений.

Образующиеся в котле отложения обычно распределены по его внутренней поверхности неравномерно. Поэтому следует считаться с тем, что в тех местах, где отложения незначительны, после их удаления кислота будет растворять металл, что является недопустимым. Для предотвращения такого явления в приготовленный рабочий раствор кислоты вводят вещества, называемые *замедлителями* коррозии, *пассиваторами или ингибиторами.* Эти вещества, не препятствуя растворению отложений, защищают металл от воздействия кислоты. Следовательно, присадка в рабочий раствор кислоты эффективных замедлителей является основным условием сохранности оборудования при кислотных чистках. Замедлители не добавляют в растворы хромовой кислоты, которая не вызывает коррозии металла.

В качесте замедлителей применяют уротропин, столярный клей, уникол и др. Тот или иной замедлитель обычно оказывается эффективным лишь при определенных условиях. Некоторые замедлители хорошо защищают металл в одной кислоте и значительно меньше в другой. Например, уротропин обладает высоким защитным эффектом в соляной кислоте и пониженным в фосфорной. Поэтому весьма важно правильно выбрать замедлитель для данных конкретных условий.

Кислотная промывка барабанного котла производится по схеме, представленной на рис. 3-7. Рабочий раствор кислоты крепостью не выше 5—6% приготовляется в бачке *1* путем подачи в него воды *10*, кислоты *9* и пара *11* для подогрева до температуры не выше 70° С. Затем насосом *2* раствор кислоты подается в котел через дренажные штуцера *3* снизу. Заглушками *4* котел отсоединяется от других работающих котлов. После заполнения котла начинается непрерывная циркуляция раствора по замкнутому контуру: из бачка *1* насосом *2* в котел *5* и по сливной линии *6* снова в бачок *1*. Раствор кислоты подогревается в бачке *1* паром до температуры не выше 70° С. При необ-

ходимости промывку можно произвести не всего котла, а отдельных наиболее загрязненных его элементов (например, только пароперегревателя или экономайзера).

В процессе промывки кислота расходуется на растворение отложений и концентрация ее падает. Отбирая пробы из пробоотборных кранников 7 (C'') и 8 (C') с учетом

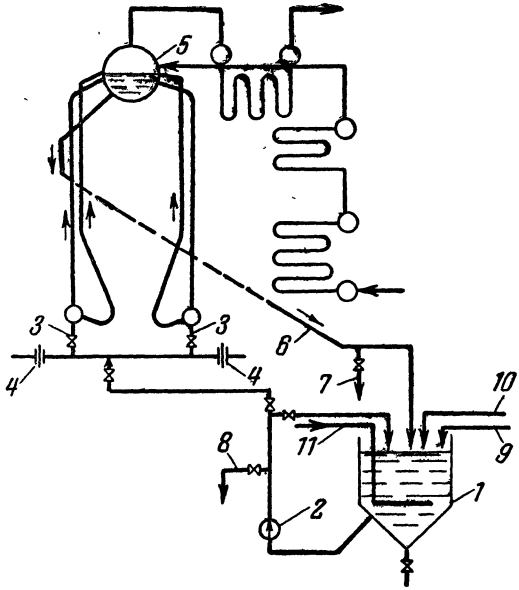


Рис. 3-7. Схема кислотной очистки барабанного котла.

времени пребывания раствора в котле t, можно определить скорость растворения отложений ΔC, которая в среднем будет равна:

$$\Delta C = \frac{C' - C''}{t} \quad [мг\text{-}экв/л \cdot ч], \qquad (3\text{-}27)$$

где C' и C'' — концентрации кислоты[1] в отобранных пробах *мг-экв/л*.

[1] Если отложения содержат значительное количество железа, то определить C' или C'' титрованием щелочью не представляется возможным, так как образующееся $FeSO_4$ или $FeCl_2$ определяются как кислота. В этом случае длительность кислотной промывки определяют опытным путем по вырезанному из трубы образцу, погруженному в проточную струю кислоты.

Вначале промывки концентрация раствора кислоты обычно быстро снижается, а к концу приобретает почти постоянное значение. Если с началом циркуляции раствора начать отбирать через 15—30 *мин* пробы из краника 7, то изменение концентрации кислоты со временем будет иметь характер, аналогичный кривой рис. 3-8,*а*. В точке t_a промывку следует прекратить. При более крутом падении кривой (пунктир) необходим дополнительный ввод кислоты в бак *1*. Тогда график промывки будет иметь вид, изображенный на рис. 3-8,*б*.

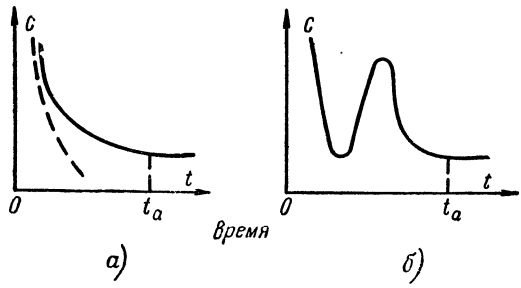


Рис. 3-8. Примерный характер изменения концентрации раствора кислоты при кислотной промывке.

Если отложения в основном состоят из $CaCO_3$, то расход 100%-ной кислоты $Б$ определяется формулой

$$Б = \frac{\sigma H Э_к}{5 \cdot 10^4} \ [кг], \qquad (3\text{-}28)$$

где H — поверхность аппарата, $м^2$;
$Э_к$ — эквивалент кислоты;
σ — удельная загрязненность труб, $г/м^2$.

При другом составе отложений расход 100%-ной кислоты подсчитывается по заливаемому объему раствора $V_р^к$ $[м^3]$ и его концентрации $C_{вп}$:

$$Б = 10 C_{вп} V_р^к \gamma_р^к . \qquad (3\text{-}29)$$

Кислотные промывки являются эффективным способом удаления отложений из различных аппаратов. Однако они не могут рассматриваться как эксплуатационная мера борьбы с накипеобразованием, так как кислота даже в присутствии эффективных замедлителей все же растворяет металл и систематическое применение кислотных промывок создает опасность повреждения оборудования. Бороться с отложениями необходимо способами, которые предотвращают их образование.

Удаление отложений из прямоточных котлов производится путем водных промывок, для чего при горящей топке через котел прокачивается питательная вода. Выходящие

из котла вода или влажный пар сбрасываются в специальный растопочный (сборный) бак или в питательную систему барабанных котлов. Проходя по змеевикам котла, вода растворяет отложения, чем и достигается их удаление.

В ряде случаев, особенно для котлов малой производительности и низкого давления, оказывается целесообразным вместо кислотной промывки применить обработку отложений кальцинированной содой или тринатрийфосфатом. Полностью удалить накипь при этом не удается, однако она в значительной мере размягчается, чем облегчается последующая механическая очистка котла.

В этом способе в котловой воде предназначенного для чистки котла создается высокая концентрация ионов CO_3^{2-} или PO_4^{3-} путем ввода Na_2CO_3 (если в отложениях преобладает $CaSO_4$ или $CaSiO_3$) или Na_3PO_4 (для накипей любого состава). После ввода реагентов котел на пониженной нагрузке пускается в работу на 30—40 *ч*. За это время он усиленно продувается для удаления образующегося шлама и производится восполнение расходующихся реагентов. Сущность процессов, происходящих в котле, можно представить следующими ионными реакциями:

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3,$$

или

$$3Ca^{2+} + 2PO_4^{3-} \rightarrow Ca_3(PO_4)_2.$$

Находящиеся в растворе ионы кальция связываются анионами CO_3^{2-} или PO_4^{3-} и удаляются в шлам. На их место из накипи переходят в раствор новые катионы Ca^{2+}, которые также связываются и выводятся из раствора. Таким образом происходит медленный процесс разрыхления твердых накипных отложений.

3-5. 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 так называемую оборотную систему водоснабжения, в которой охлаждающая вода циркулирует по

замкнутому циклу, нагреваясь в охлаждаемых аппаратах и охлаждаясь в бассейне (или градирне), где она разбрызгивается.

При таком круговороте в воде протекают различные процессы. При разбрызгивании происходит удаление из воды растворенной CO_2 и вследствие этого распад бикарбоната кальция по реакции

$$Ca(HCO_3)_2 \rightarrow CaCO_3 + \uparrow CO_2 + H_2O$$

начинает идти слева направо, т. е. в сторону образования карбоната кальция. 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. Если система работает без вывода части воды из оборота (без продувки), то это увеличение концентрации будет подчиняться следующей зависимости:

$$C_ц = C_д\left(1 + \frac{Q_д}{V_в}t\right) \ [мг/л], \qquad (3\text{-}30)$$

где $C_ц$, $C_д$ — концентрация не выпадающих в осадок нелетучих веществ в оборотной и добавляемой (свежей) воде;

$Q_д$ — количество добавляемой в систему воды, $м^3/ч$;

$V_в$ — объем воды в системе, $м^3$;

t — время работы системы без продувки, $ч$.

Отношение

$$K_у = \frac{C_ц}{C_д} = 1 + \frac{Q_д}{V_в}t \qquad (3\text{-}31)$$

называется коэффициентом упаривания. Он показывает, во сколько раз повысилась концентрация солей в оборотной воде по сравнению с добавляемой (исходной).

Условие безнакипного режима работы оборотной системы определяется равенством

$$H_{кц} = K_у H_{кд}, \qquad (3\text{-}32)$$

где $H_{кц}$, $H_{кд}$ — карбонатная жесткость оборотной и добавляемой воды,

Если фактическая карбонатная жесткость воды в обороте $H^{ф}_{кц}$ будет меньше расчетной $H_{кц}$, это значит, что в оборотной системе идет выпадение $CaCO_3$ в количестве

$$\Delta H = H_{кд} K_у - H^{ф}_{кц} \ [мг\text{-}экв/л]. \qquad (3\text{-}33)$$

В эксплуатации стремятся работать с небольшим коэффициентом упаривания, что заметно уменьшает интенсивность накипеобразования. Достигнуть этого можно продувкой системы, величина которой в процентах от количества воды в обороте $Q_{об}$ может быть найдена из выражений:

$$p_{пр} = p_1 \frac{C_д}{C_ц - C_д} 100 = p_1 \frac{1}{K_у - 1} 100 \ [\%], \qquad (3\text{-}34)$$

где p_1 — испарение воды в долях от количества ее в обороте.

Вода, удаляемая продувкой из системы, заменяется в том же объеме добавляемой. Размер добавки в процентах от $Q_{об}$ определяется по формулам:

$$p_д = p_1 \frac{C_ц}{C_ц - C_д} 100 = p_1 \frac{K_у}{K_у - 1} 100 \ [\%]. \qquad (3\text{-}35)$$

Продувка оборотной системы осуществляется двумя путями; часть воды p_2 [%] уносится воздухом в виде капелек, другая выводится организованно и является собственно продувкой p_3, т. е.

$$p_{пр} = p_2 + p_3.$$

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

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

$$2HCO_3^- + 2H^+ \rightarrow 2H_2O + 2\uparrow CO_2.$$

Вследствие этого карбонатная жесткость воды уменьшается, а концентрация в ней свободной углекислоты воз-

растает. Все это приостанавливает процесс распада 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 (известкование) $Ca(OH)_2$ также приводит к разрушению иона HCO_3^-:

$$2HCO_3^- + 2OH^- \rightarrow 2CO_3^{2-} + 2H_2O.$$

В отличие от подкисления, при котором разрушается лишь небольшая часть ионов HCO_3^-, известкованием удаляются все бикарбонатные ионы и из всего потока воды. Известкование, подробно рассматриваемое в гл. 9, 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 порядка 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 (рекарбонизация), в частности топочными газами котлов, имеет целью увеличить в ней концентрацию свободной углекислоты. Для этого газы продувают через слой обрабатываемой воды или смешивают их с водой при помощи водяных эжекторов. Содержащаяся в газе CO_2 переходит при этом в раствор. Как и в случае подкисления, насыщение воды углекислотой прекращает распад бикарбоната кальция. Наиболее просто этот способ осуществляется в том случае, когда под котлами сжигается газ. Использование топочных газов котлов, работающих на пылевидном топ-

ливе, сопряжено с предварительным их обеспыливанием, что значительно усложняет и удорожает установку. Обработка охлаждающей воды топочными газами нашла применение на ряде электростанций.

Глава четвертая

ЗАГРЯЗНЕНИЕ ПАРА И СПОСОБЫ БОРЬБЫ С НИМ

4-1. Унос веществ насыщенным паром

Качество вырабатываемого котлами пара определяется количеством содержащихся в нем различных веществ — твердых и газообразных, — которые рассматриваются как загрязнения. Оно чаще всего характеризуется величиной солесодержания, под которым понимают суммарное содержание в паре нелетучих веществ, выраженное в миллиграммах на один килограмм пара (или литр конденсата).

Как показывает опыт, вырабатываемый котлами пар всегда содержит различные вещества, которые переходят в него из котловой воды. *Явление перехода в пар нелетучих веществ, присутствующих в котловой воде, называется уносом (или выносом).* Величина его характеризуется коэффициентом уноса $У$, определяемым из равенства

$$У = \frac{S_п}{S_{кв}} 100 \ [\%], \qquad (4\text{-}1)$$

где $S_п$, $S_{кв}$ — солесодержание или концентрация какого-либо вещества в паре и котловой воде, *мг/л*.

Различают унос *капельный и избирательный.* Капельным унос называют тогда, когда загрязнения поступают в пар преимущественно с капельками котловой воды, уносимыми им из барабана котла. При капельном уносе количество содержащихся в паре различных веществ пропорционально их концентрации в котловой воде, что можно выразить следующей системой равенств:

$$У = \frac{(Cl^-)_п}{(Cl^-)_{кв}} = \frac{(SO_4^{2-})_п}{(SO_4^{2-})_{кв}} = \frac{(SiO_3^{2-})_п}{(SiO_3^{2-})_{кв}} = \frac{S_п}{S_{кв}}, \qquad (4\text{-}2)$$

в которых индексами $п$ и $кв$ обозначены концентрации веществ в паре и котловой воде.

Капельки влаги возникают в барабане котла 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. Они ставятся на пути движения струй с целью гашения их кинетической энергии. При таком ударе образуются капли различного размера. Чем с большей скоростью поток пароводяной смеси входит в барабан, тем мельче капли образуются при ударе его о щиток. Потоком же пара наиболее легко уносятся именно мелкие капли. Ввиду этого при проектировании и сооружении внутрибарабанных устройств процессы дробления воды должны сводиться к минимуму или вовсе исключаться.

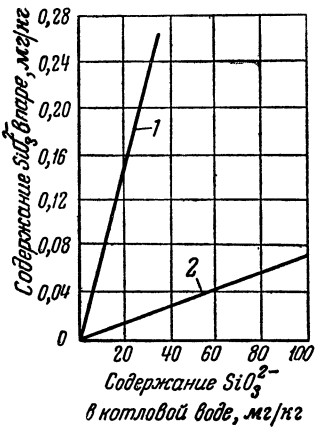


Рис. 4-1. Растворимость SiO_2 в паре.
1 — 100 — 120 *ата*;
2 — 70 — 80 *ата*.

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 разных направлениях в паровой объем. Если начальная кинетическая энергия капли достаточно велика, то она будет выброшена на большую высоту. Может случиться, что она достигнет пароотборных 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 какое-либо вещество или группа веществ переходит в пар преимущественно перед другими, т. е. в большем количестве. В этом случае равенство (4-2) для некоторых веществ нарушается. Как показывает опыт, избирательный унос имеет место для пара давлением больше 80 *ат*. До 80 *ат* преобладает капельный унос.

Избирательный унос объясняется тем, что отдельные вещества, содержащиеся в котловой воде, обладают способ-

ностью растворяться в паре высоких параметров. Среди таких веществ выделяется кремниевая кислота H_2SiO_3, растворимость которой в паре, начиная с 80 *ат*, быстро возрастает, как это можно видеть из графика рис. 4-1. Коэффициент выноса кремнекислоты при 110 *ата* достигает 1%, а при 185 *ата* — 7% и выше.

Попадая в пароперегреватель, кремнекислота теряет воду (дегидратируется $H_2SiO_3 \rightleftarrows H_2O—SiO_2$) и поступает в турбину в виде SiO_2,

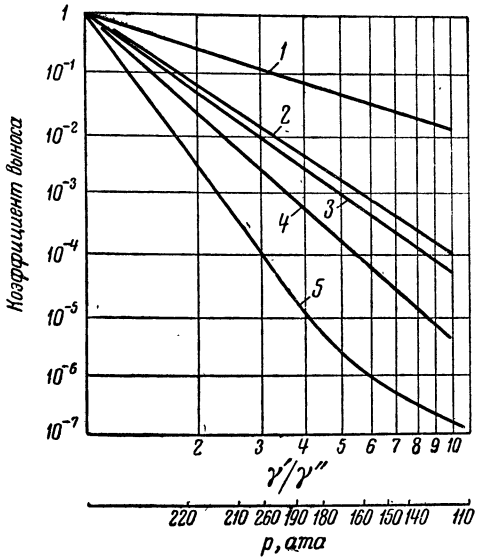


Рис. 4-2. Зависимость коэффициента выноса различных солей от давления пара.
1 — SiO_2; *2* — NaOH; *3* — NaCl; *4* — $CaCl_2$; *5* — Na_2SO_4.

которая дает на лопатках турбин нерастворимые в воде отложения. Это наиболее вредные отложения, так как полное их удаление связано с остановкой турбины и ее вскрытием.

В условиях котловой воды кремниевая кислота может образоваться в результате гидролиза силикатов:

$$Na_2SiO_3 + 2H_2O \rightleftarrows H_2SiO_3 + 2NaOH.$$

При недостаточной щелочности котловой воды равновесие этой реакции сдвигается в сторону образования кремниевой кислоты и вынос ее увеличивается. Чтобы подавить гидролиз силикатов, гидратная щелочность котловой воды должна быть больше некоторого минимума. Это условие характеризуется величиной эквивалентного отношения $(NaOH):(SiO_2)$, которое должно быть больше единицы.

Кроме кремниевой кислоты, склонность к избирательному уносу при больших давлениях обнаруживают и дру-

тие соединения ($NaCl$, Na_2SO_4). На графике рис. 4-2 представлена зависимость коэффициента выноса от давления пара для различных веществ, из которого следует, что наибольшей растворимостью в паре обладает кремниевая кислота, наименьшей — сульфат натрия. Таким образом, для котлов сверхвысоких параметров избирательный унос становится основным источником загрязнения насыщенного пара.

4-2. Факторы, влияющие на качество пара

Конструктивные особенности котла

Качество насыщенного пара, вырабатываемого котлами, зависит от многих причин и в том числе от конструктивных особенностей котла: высоты и объема парового простран-

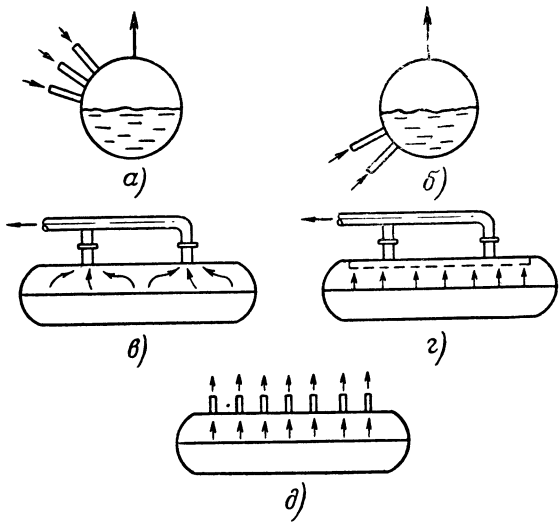


Рис. 4-3. Способы подвода в барабан пароводяной смеси и отвода из него пара.

ства барабана, способа ввода пароводяной смеси в барабан — в паровое пространство (рис. 4-3,*а*) или под уровень котловой воды (рис. 4-3,*б*), способа отбора пара из барабана — сосредоточенного (рис. 4-3,*в*) или равномерного по всему барабану (рис. 4-3,*г*, *д*,), наличия и эффективности внутрибарабанных устройств и др.

Важнейшими факторами, заданными конструкцией кот-

ла, являются удельная нагрузка парового объема барабана $R_б$ и зеркала испарения $R_з$.

Средняя удельная нагрузка (паронапряжение) парового объема определяется формулой

$$R_б = \frac{D_n v'' \cdot 10^3}{V_{пк}} \quad [м^3/м^3 \cdot ч], \qquad (4\text{-}3)$$

где v'' — удельный объем пара, $м^3/кг$;
$V_{пк}$ — паровой объем барабана, $м^3$.

Она показывает, сколько кубических метров пара снимается с одного кубического метра парового объема барабана за один час.

Паровой объем барабана может быть нагружен неравномерно. В этом случае паронапряжение отдельных его участков может значительно превышать усредненную величину $R_б$. 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.

Величина $R_б$ зависит для данного котла от давления пара: она увеличивается с уменьшением давления, если нагрузка остается неизменной. Это следует учитывать при переводе данного котла на работу с пониженным давлением.

Время пребывания пара в паровом объеме котла τ и паронапряжение этого объема связаны обратной зависимостью:

$$\tau = \frac{1}{R_б}.$$

Уменьшение τ с увеличением $R_б$ означает повышение скорости движения пара в паровом объеме, что и обусловливает вынос влаги. Для современных мощных котлов среднего и высокого давлений величина паронапряжения $R_б$ изменяется примерно от 350 до 1 200 $м^3/м^3 \cdot ч$

Для котлов низкого давления старых конструкций $R_б$ не превышает 400 — 500 $м^3/м^3 \cdot ч$, исключая котлы Шухова—Берлина, для которых паронапряжение достигает 1 500 $м^3/м^3 \cdot ч$. Эти котлы весьма чувствительны к качеству котловой воды и часто выдают пар с повышенной влажностью. Наоборот, горизонтально-водотрубные котлы системы Бабкок, имеющие $R_б$ в пределах 200—300 $м^3/м^3 \cdot ч$, выдают пар удовлетворительного качества даже при весьма высоком сухом остатке котловой воды, доходящем до 30—40 тыс. $мг/л$. В котлах

высокого давления ТП-170 и ТП-230 110 *ата* паронапряжение основного барабана составляет при полной нагрузке соответственно 350 и 450 $м^3/м^3 \cdot ч$, что соответствует времени пребывания пара в паровом объеме барабана порядка 8—10 *сек*.

Влияние величины паронапряжения парового объема на размер выноса веществ с паром иллюстрирует график рис. 4-4.

При вводе пароводяной смеси в барабан под уровень котловой воды пузырьки пара пронизывают всю толщу

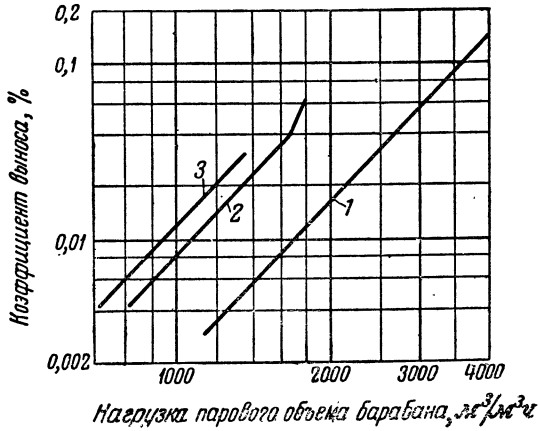


Рис. 4-4. Зависимость изменения влажности пара от нагрузки парового объема барабана.
1 — 36 *ата*; *2* — 91 *ата*; *3* — 110 *ата*.

котловой воды и выходят в паровой объем через зеркало испарения. В связи с этим приобретает важное значение величина паронапряжения зеркала испарения $R_з$, которая показывает количество кубических метров пара, проходящее через 1 $м^2$ зеркала испарения за 1 *ч*:

$$R_з = \frac{D_n v'' \cdot 10^3}{F_з} [м^3/м^2 \cdot ч\ (м/ч)]. \qquad (4\text{-}4)$$

Учитывая размерность, можно также сказать, что величина $R_з$ характеризует линейную скорость движения пара через зеркало испарения.

Пузырьки пара движутся через слой котловой воды толщиной $h_{кв}$ [*м*] с некоторой скоростью $v_п$ [*м/сек*]. Это

значит, что они находятся в толще воды какое-то время, равное

$$\tau_п = \frac{h_{кв}}{v_п} [сек]. \qquad (4\text{-}4а)$$

Чем меньше скорость $v_п$, тем дольше существуют пузырьки пара в котловой воде. Это ведет к насыщению воды паром, т. е. к образованию пароводяной смеси, удельный вес которой $\gamma_{см}$ заметно меньше удельного веса воды γ'. 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 $h^{б}_{кв}$ оказывается выше уровня $h^{ст}_{кв}$, отмечаемого по стеклу (рис. 4-5):

$$h^{ст}_{кв} = h^{б}_{кв} \frac{\gamma_{см}}{\gamma'}. \qquad (4\text{-}5)$$

Следовательно, подача пароводяной смеси под зеркало испарения сопряжена с явлением набухания уровня. В этих условиях особенно нежелателен сосредоточенный подвод пароводяной смеси под уровень воды, 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 (рис. 4-6). Он выравнивает нагрузку зеркала испарения и уменьшает степень набухания котловой воды.

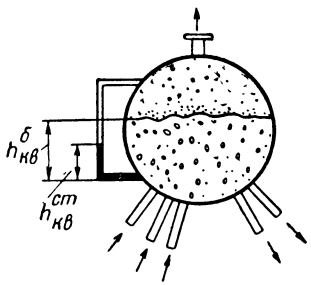


Рис. 4-5. Схема набухания котловой воды.

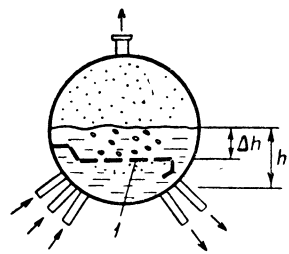


Рис. 4-6. Схема сепарации с водопогруженным дырчатым листом.
1 — дырчатый лист.

Важным конструктивным фактором, определяемым диаметром барабана, является также и высота парового объема $h_{по}$, влияние которой на качество пара отчетливо видно из графика рис. 4-7.

б) Эксплуатационный режим котла

Работа парового котла сопровождается 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.

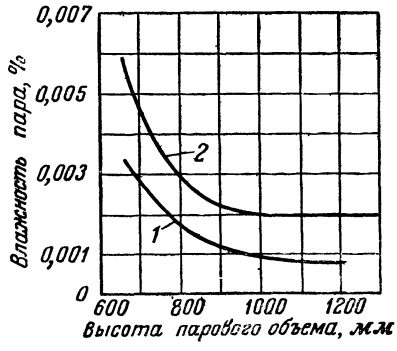


Рис. 4-7. Зависимость влажности пара от высоты парового объема. *1* — 110 *ата*; $R_з$ — 100 *м³/м²·ч*; *2* — 185 *ата*, $R_з$ — 50 *м³/м²·ч*.

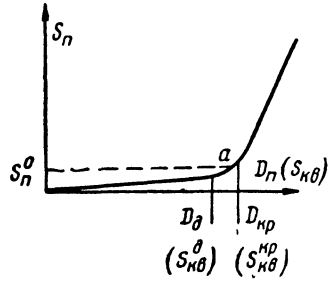


Рис. 4-8. Зависимость качества пара от паропроизводительности котла (от качества котловой воды).

Загрязнение пара увеличивается с ростом нагрузки котла. Зависимость $S_п$ от $D_п$ может быть представлена кривой рис. 4-8, на которой точка a обозначает предельно допустимое солесодержание насыщенного пара. До точки a качество пара не выходит из области допустимых значений. Дальнейший рост нагрузки вызывает резкое его ухудшение. Нагрузка, соответствующая точке a, т. е. нагрузка, превышение которой вызывает недопустимое действующими нормативами загрязнение пара, называется *критической*. В качестве эксплуатационной принимается *допустимая* нагрузка $D_д = (0{,}7 - 0{,}8) D_{кр}$. Область, лежащая влево от точки a, называется *докритической*, вправо — *закритической*. Паровые котлы всегда должны работать в докритической области нагрузок. Для этого необходимо, чтобы проектная производительность котла $D_п^o$ была меньше его

критической нагрузки $D_n^o = (0{,}7 \div 0{,}8) D_{кр}$; при $D_{кр} \leqq D_n^o$ имеют место ограничение нагрузки котла по условию качества пара. Величина критической нагрузки котла 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 котла постоянной величиной и может быть рядом мероприятий изменена в сторону увеличения. Критическая нагрузка не поддается расчету и может быть установлена только путем проведения специальных теплохимических испытаний.

Для получения нормального качества пара, кроме величины нагрузки, важным является и характер ее изменения. Резкое увеличение нагрузки котла может вызвать падение давления пара в барабане и вскипание котловой воды. Последнее сопровождается набуханием ее и уменьшением в силу этого парового объема, что обусловливает увлажнение пара. Вот почему резко переменная пиковая нагрузка котла является весьма нежелательной.

В процессе эксплуатации фактическая нагрузка котла может как возрастать, так и убывать. Однако при установившемся режиме работы количество снимаемого с котла пара примерно соответствует количеству тепла, вводимого в топку. Нарушение этого соответствия вызывает изменение давления пара в барабане котла. Большей частью такое нарушение наблюдается на котлах, не оборудованных автоматикой и обслуживающих потребителей с резко переменным расходом пара. К их числу, в частности, можно отнести поршневые паровые машины прокатных станов и паровых молотов, электроплавильные печи, пропарку и продувку промышленных газопроводов и др. При наличии таких потребителей большой расход пара возникает неожиданно, вызывая, как говорят, наброс нагрузки на котел. Ввиду этого котел в течение некоторого периода отдает пар в большем количестве, чем получает топлива, что приводит к падению давления пара в барабане. В этом случае в котловой воде возникает избыток тепла, равный $(i_0 - i_1) V_к \cdot 10^3$ [*ккал*], за счет которого образуется пар приблизительно в количестве

$$d_n = \frac{(i_0 - i_1) V_к \cdot 10^3}{r} [кг], \qquad (4\text{-}6)$$

где r — теплота парообразования при данном давлении;

i_0, i_1 — теплосодержание котловой воды до и после падения давления пара в барабане, *ккал/кг*;

$V_к$ — объем воды в котле, $м^3$.

Если в этой формуле положить $V_к = 1$, а разность $(i_0 - i_1)$ определить из условия понижения давления в котле на 0,5 *ати*, то можно

найти количество пара, образующееся из 1 $м^3$ котловой воды при ее вскипании. Оно примерно равно при 16 *ат* — 0,6; 32 *ат* — 0,15 и 110 *ат* — 0,03 $м^3$.

Расчет показывает, что при набросе паровой нагрузки в размере 25% от номинальной скорость падения давления в барабане котла составляет порядка 0,12 *ат/сек* для давления 110 *ат* и 0,07 *ат/сек*— для 35 *ат*, т. е. котлы высокого давления более чувствительны к изменению давления, чем котлы среднего и тем более низкого давлений. При таком набросе нагрузки уровень котловой воды увеличивается со скоростью для котлов высокого давления 30—50 *мм/сек* и среднего давления—около 40 *мм/сек*.

Характер зависимости качества пара от уровня котловой воды аналогичен зависимости $S_п = \varphi(D_п)$, графически представленной на рис. 4-8. Здесь также существует предельная (критическая) высота уровня, превышение которой вызывает резкое ухудшение качества пара. Для работающего котла устанавливаются верхняя и нижняя границы изменения уровня котловой воды. Первая задается из условия обеспечения нормального качества пара, вторая — надежности циркуляции. На практике стремятся работать при среднем уровне котловой воды, не допуская значительных и резких его колебаний.

в) Качество котловой воды

При удовлетворительном эксплуатационнном режиме работы котла и отсутствии значительных изъянов в его конструкции качество пара будет целиком зависеть от качества котловой воды $S_п = f(S_{кв})$ (рис. 4-8). До точки a увеличение солесодержания котловой воды не сказывается заметно на солесодержании пара, которое в этот период не выходит из допустимых пределов $S_п^0$. Дальнейшее увеличение $S_{кв}$ вызывает резкое ухудшение качества пара. Солесодержание котловой воды, отвечающее точке a, называется *критическим*. В качестве эксплуатационной нормы принимается *допустимое* солесодержание $S_{кв}^{д}$, на 20—30% меньшее критического. Зависимость $S_п = f(S_{кв})$ устанавливается путем проведения специальных теплохимических испытаний котла. Вид ее, указанный на рис. 4-8, наиболее характерен для случая капельного уноса. Величина критического солесодержания котловой воды не является для данного котла раз и навсегда заданной, так как рядом мероприятий всегда возможно изменить ее в сторону увеличения.

Увеличение $S_{кв}$ делает котловую воду склонной к вспе-

ниванию, под которым понимают образование на поверхности зеркала испарения устойчивой пены. Образование пены в котле весьма нежелательно, поскольку разрушение ее служит источником увлажнения пара. При достаточно обильном пенообразовании в пароперегреватель могут уноситься клочья пены, обусловливая сильное увлажнение и загрязнение пара. Пенообразованию способствует ряд условий, из которых следует отметить: высокое солесодержание котловой воды; наличие в ней масла или высокой концентрации щелочи; содержание в котловой воде взвешенного мелкодисперсного шлама.

В практике работы котлов нередко имеет место периодическое кратковременное ухудшение качества пара, отмечаемое на диаграммах солемеров. Такое явление получило название *бросков* котловой воды. Причинами возникновения бросков могут быть: резкое падение давления пара в барабане из-за наброса нагрузки, значительное повышение уровня котловой воды (перепитки котла), попадание в котел масла или в большом количестве щелочи, превышение установленных норм котловой воды по щелочности и сухому остатку и др. Во всех этих случаях конечным результатом является уменьшение высоты и объема парового пространства барабана котла из-за увеличения уровня котловой воды, что и служит непосредственной причиной увлажнения пара.

г) Другие источники загрязнения пара

Иногда загрязнение насыщенного пара барабанных котлов происходит по причинам, не зависящим от водного или эксплуатационного режима работы котла. Чаще всего это происходит из-за неплотности пароохладителей. Регулирование температуры перегрева пара производится путем охлаждения его в специальных теплообменниках питательной или котловой водой. Если эти теплообменники имеют неплотности, то в пар попадает питательная или котловая вода, обусловливая сильное его загрязнение. Нередко регулирование температуры перегрева пара производят путем впрыска в него воды. Если солесодержание этой воды будет высоким, занос проточной части турбин окажется неизбежным. Поэтому для впрыска употребляется высококачественный конденсат. Второй причиной загрязнения пара, встречающейся на практике, являются недостатки в схеме или в сборке внутрибарабанных сепарирующих устройств.

4-3. Образование солевых отложений в пароперегревателях и турбинах и их удаление

а) Пароперегреватели

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

Капля котловой воды будет выпарена нацело, если температура перегрева пара $t_{пп}$ будет больше температуры кипения насыщенного раствора $t_{нр}$. Появляющиеся при этом сухие вещества останутся в паре или частично осядут в пароперегревателе, образуя солевые отложения. Если $t_{нр} > t_{пп}$, выпаривание капли невозможно и она уйдет из пароперегревателя в виде густого раствора. Численное значение $t_{нр}$ зависит от состава („букета") веществ, присутствующих в капле. Преобладание веществ, имеющих положительный коэффициент растворимости (NaOH, NaCl, KCl), приводит к условию $t_{нр} > t_{пп}$. Соотношение $t_{нр} < t_{пп}$ характерно для случая преобладания в капле веществ с отрицательным коэффициентом растворимости (Na_2SO_4, Na_3PO_4 и др.).

Как показывает опыт, пароперегреватели нормально работающих котлов в той или иной степени (обычно небольшой) заносятся солевыми отложениями, которые, как правило, состоят из хорошо растворимых в воде соединений натрия. Чтобы устранить возможность накопления отложений, пароперегреватели регулярно промываются. Промывка может быть *общей* или *индивидуальной*. При общей промывке (рис. 4-9,*а*) воду (обычно питательную или конденсат) подают в коллектор перегретого пара *1*, из которого она по всем змеевикам поступает в барабан котла. Если коллектор насыщенного пара *2* имеет дренажную линию, то промывочную воду сбрасывают в дренаж помимо котла. Перед промывкой пароперегреватель заполняется водой и оставляется в таком состоянии на 1—2 *ч*. К достоинству общей промывки относится то, что она легко осуществима на котлах всех типов и требует небольшой затраты времени и труда. Однако она не гарантирует удаления отложений со всех змеевиков перегревателя. Это происходит потому, что по загрязненным змеевикам, имеющим бо́льшее сопротивление, чем чистые, будет протекать меньшее количество воды и они могут остаться неотмытыми. Кроме того, малые скорости движения воды по трубкам перегревателя делают общую промывку недостаточно эффективной.

Индивидуальная промывка, при которой промывается каждый змеевик в отдельности, лишена этих недостатков, но зато она требует затраты значительно большего времени и отличается трудоемкостью. Поэтому общая промывка производится в кратковременные (2—3 дня) остановки котла на профилактический ремонт, а индивидуальная — в период капитального ремонта котлоагрегата.

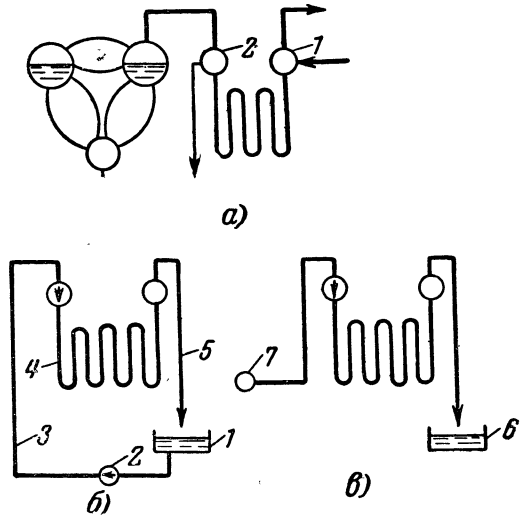


Рис. 4-9. Схемы промывки пароперегревателей.
а — общая промывка; *б* — замкнутая; *в* — разомкнутая.

Применяются две схемы индивидуальной промывки: замкнутая (рис. 4-9,*б*) и разомкнутая (проточная, рис. 4-9,*в*). Промывка производится в следующем порядке. Перед промывкой пароперегреватель заполняется водой и оставляется на несколько часов. Затем, если промывка производится по замкнутой схеме, бачок *1* объемом примерно 0,3 — 0,5 $м^3$ заполняется водой и пускается насос *2*. Подаваемая им по шлангу *3* вода проходит змеевик *4* и шлангом *5* вновь отводится в бачок. В процессе промывки производится определение солемером сухого остатка (или щелочности) пробы воды $S_к$ из бачка *1*. Вначале $S_к$ быстро нарастает, что свидетельствует о вымывании отложений. Прекращение роста $S_к$ указывает на окончание процесса

отмывки. Тогда насос *2* останавливается, вода в бачке *1* заменяется чистой и начинается промывка следующего змеевика.

Недостаток замкнутой схемы заключается в том, что уже после первого прохода через змеевик вода становится мутной, так что последующая промывка змеевика производится уже грязной водой. Этот недостаток устранен в проточной схеме, в которой змеевик промывается все время чистой водой, поступающей в него из напорной магистрали 7. Пройдя змеевик, вода собирается в бачке *6*, объем которого должен вместить всю промывочную воду. Длительность промывки одного змеевика обычно не превышает 2—3 *мин*.

Для эксплуатации важно знать общее количество отложений, образовавшееся в пароперегревателе за предыдущий период работы котла, B_c [*кг*], а также и их распределение по змеевикам. Величина B_c может быть найдена, если при промывке пароперегревателя измерен объем пропущенной через него воды $V_{пв}$ [$м^3$], начальное $S_н$ и конечное $S_к$ солесодержания воды. Тогда

$$B_c = (S_к - S_н) V_{пв} \cdot 10^{-3} \ [кг]. \qquad (4\text{-}7)$$

Если осуществляется индивидуальная промывка, то

$$B_c = \Sigma B_i \text{ и } B_i = (C_к - C_н) V_{пв} \cdot 10^{-3} \ [кг[, \qquad (4\text{-}7а),$$

где B_i — количество отложений в i-том змеевике, *кг*;

$V_{пв}$ — объем воды, пропущенный через i-тый змеевик, $м^3$.

б) Паровые турбины

В паровых турбинах соли откладываются преимущественно на лопатках. Непосредственным следствием этого являются увеличение шероховатости поверхности лопаток, искажение профилей каналов и перераспределение тепловых перепадов из-за неравномерного отложения солей по разным ступеням. Все это обусловливает снижение экономичности работы турбины. При значительном заносе лопаточного аппарата живое сечение проходу пара уменьшается и мощность турбины снижается.

Степень заноса проточной части турбины удобно оценивать по степени повышения давления в камере регулирующей ступени ξ по формуле

$$\xi = \frac{p' - p}{p} 100 \ [\%], \qquad (4\text{-}8)$$

где p, p' — давление пара в камере регулирующей ступени при чистой и занесенной проточной части турбины, *ати*.

Испытанием турбины ВР-100-2 было установлено, что величине $\xi = 3\%$, при которой нагрузка турбины еще не снижалась, отвечает перерасход свежего пара порядка 0,8%, что дает убыток в размере примерно 40—50 руб. в час.

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 твердых частичек и в растворенном состоянии. Для давлений > 80 *ати* большая часть веществ находится в перегретом паре именно в состоянии раствора.

В турбине происходит непрерывное изменение параметров пара, т. е. уменьшение его давления и температуры. Вместе с этим изменяется и растворимость в паре содержащихся в нем 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, выпадание 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, прилипая к их поверхности при ударе. Как показывает опыт, отложениями заносятся только некоторые из многих ступеней давления турбины (рис. 4-10). 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, хло-

рида и карбоната натрия, в то время как основная часть отложений в турбинах высокого давления состоит из кремнекислых соединений.

Основным способом борьбы с отложениями в турбинах является предупреждение их образования путем обеспечения высокого качества пара. Если отложения все же возникают, удаление их производится промывкой проточной части турбины влажным паром. Для этого на некотором расстоянии от промываемой турбины, нагрузка которой

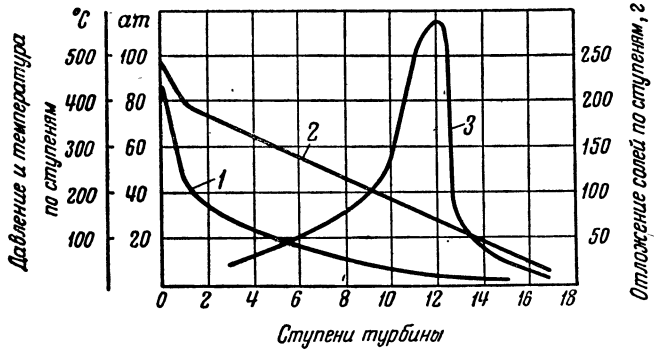


Рис. 4-10. Распределение солевых отложений по ступеням турбины высокого давления (100 *ати*).

1 — изменение давления по ступеням турбины; *2* — изменение температуры по ступеням турбины; *3* — количество отложений по ступеням турбины.

снижается при этом на 50—70%, в паропровод впрыскивается через специальное увлажнительное устройство конденсат. Увлажненный пар поступает в турбину и смывает все водорастворимые соединения. Смытые соли растворяются в конденсате. Количество вымытых из турбины солей можно поэтому определить по приросту солесодержания турбинного конденсата. В том случае, когда в турбине образуются нерастворимые в воде силикатные отложения, в пар вводится раствор едкого натра, хорошо растворяющего SiO_2.

4-4. Сепарационные устройства

Внутрибарабанные устройства имеют прямое отношение к обеспечению чистоты насыщенного пара. Они предназначены для гашения кинетической энергии входящих в барабан потоков пароводяной смеси, отделения пара от

воды (грубая сепарация) и осушение пара, т. е. удаление из него капельной влаги (тонкая сепарация).

Сепарация (отделение, выделение) влаги из потока пара основана на разности удельных весов насыщенного пара γ'' и воды γ': чем она больше, тем лучше и легче отделяется влага. С повышением давления пара разность $\gamma' - \gamma''$ уменьшается и тем самым усложняются условия сепарации.

Использование этой разности весов на практике осуществляется 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 заключается в том, что на пути парового потока устанавливаются 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. Многократное столкновение с пластинами и отражение от них в специальных элементах сепарационных устройств усиливают эффективность влагоотделения.

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

Во всех этих случаях происходит удар струи о щиток, что сопровождается интенсивным дроблением воды. Последнего можно избежать, если щитки устанавливать на каждую трубу в отдельности. В этом случае имеется возможность погасить энергию струи без удара, обеспечив в то же время необходимые условия для отделения воды от пара, что достигается приданием щитку такой формы, чтобы струя встречала его по касательной. При дальнейшем движении в силу центробежного эффекта вода прижимается к щитку и приобретает форму плоской пленки, а пар свободно отделяется от воды. Индивидуальные щитки при правильном их применении дают удовлетворительные результаты.

При вводе пароводяной смеси в водяной объем котла 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 (рис. 4-6). Дырчатый лист создает определенное сопротивление движению пара, что и побуждает его распределяться по всей площади листа.

Кроме щитков, для той же цели широко используются *циклоны*, которые особенно эффективны при концентрированной котловой воде, склонной к вспениванию. Внутрибарабанный циклон (рис. 4-11) представляет собой полый цилиндр (диаметром 300 *мм* и высотой 500—700 *мм*). Пароводяная смесь специальным коробом *1* подводится в него по касательной. Возникающим от этого вращением вода отбрасывается к стенке и стекает вниз, а пар выходит вверх по образующейся в центре полости. Таким образом, в циклоне происходит безударное гашение кинетической энергии пароводяной струи, что исключает дробление воды. Циклоны, однако, обладают повышенным гидравлическим сопротивлением и при недостаточном циркуляционном напоре неприменимы.

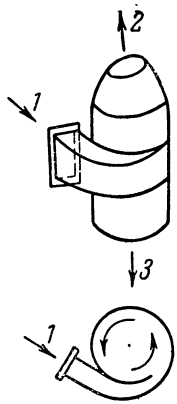


Рис. 4-11. Внутрибарабанный циклон.

1 — поступление пароводяной смеси; *2* — выход пара; *3* — выход котловой воды.

Основным элементом всех современных сепарационных схем является большой свободный паровой объем, обеспечивающий осадительную сепарацию. Назначение же рассмотренных элементов (щитков, перегородок, циклонов) сводится к созданию равномерной нагрузки этого сепарационно-активного парового объема. На рис. 4-12 представлены схемы внутрибарабанной сепарации пара, которые нашли применение на практике. Схемы *а*, *б* и *в* рассчитаны на поступление пароводяной смеси только в паровой объем барабана; схемы *г* и *е* допускают подвод смеси также и под уровень котловой воды, вариант *д* применим только при вводе смеси в водяной объем. Во всех схемах в качестве обязательного элемента применяется потолочный дырчатый щит *3*, устанавливаемый перед пароотборными трубами. Основная его роль сводится к обеспечению равномерного отбора пара по всей длине барабана.

Рассмотренные схемы отличаются наличием большого сепарационно-активного объема *6*, в котором происходит окончательная осушка пара. В схеме *а* пар в камере *9* движется вдоль барабана и у его торцов входит уже в паровой объем *6*. Схема *г* предусматривает размыв пены, достигаемый тем, что питательная вода подается в корыто *10*,

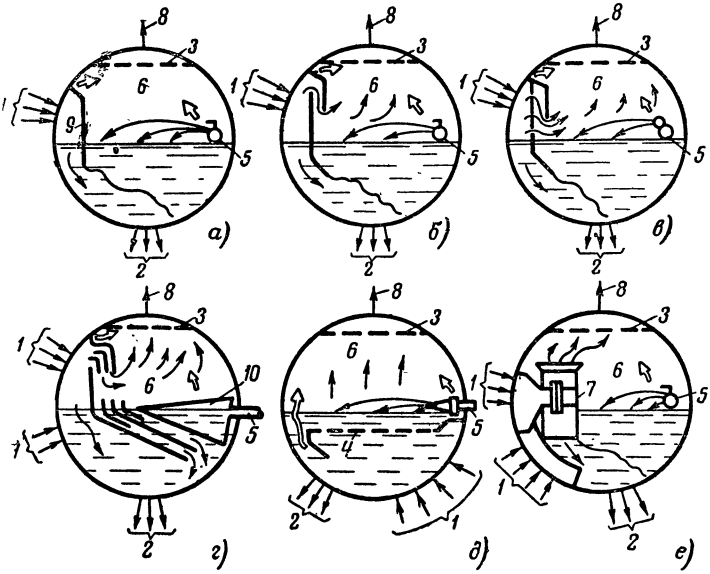


Рис. 4-12. Схемы сепарационных устройств.

1 — ввод пароводяной смеси; *2* — опускные трубы; *3* — потолочный дырчатый щит; *4* — погруженный дырчатый щит; *5* — питательная труба; *6* — сепарационно-активный объем; *7* — циклон; *8* — отвод пара.

занимающее большую часть зеркала испарения. Переливаясь из него, питательная вода разрушает (размывает) пену, если таковая образуется.

Рассмотренные схемы сепарационных устройств (рис. 4-12) позволяют получить удовлетворительные результаты 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, питательной воды, пароводяной смеси или влажного пара не должны прорываться в поток осушенного пара, минуя или «пробивая» сепарационные устройства и сепарационно-активный объем. В качестве примера на рис. 4-12 большими стрелками по-

казаны возможные места неплотностей и прорывов увлажненных потоков помимо парового объема.

Проверка качества сборки сепарационных устройств после ремонта или монтажа котла состоит в контроле степени герметичности сварных швов и другого вида соединений, нарушение плотности которых может привести к попаданию влаги в осушенный пар. Один из способов проверки заключается в просвечивании сварного шва или болтового соединения переносной электролампой, помещаемой под проверяемый щиток. Наблюдением с другой стороны щитка можно заметить просвечивающиеся неплотности. Вместо лампочки можно применить высоконапорную небольшую струю воды, которая будет обнаруживать неплотности, пробивая их.

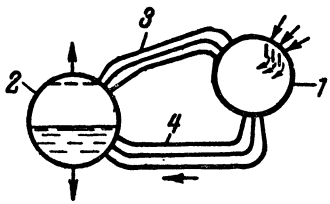


Рис. 4-13. Схема сепарации с разделительным барабаном.

В котлах высокого давления ТП-170 и ТП-230 применена схема сепарации с разделительным барабаном (рис. 4-13). Вывод пароводяной смеси со всех труб осуществлен в малый (разделительный) барабан *1*, в котором происходят гашение энергии входящих пароводяных потоков и разделение пара и воды. В основной барабан *2* пар поступает по пароперепускным трубам *3*, а вода — по трубам *4*. Разделительный барабан оснащен щитками, а основной — схемой сепарации с размывом пены.

Сепарационные устройства и схемы, аналогичные или идентичные описанным, предназначены для осушения пара, т. е. для удаления из него капельной влаги, содержащей загрязнения. Однако они не могут удалить вещества, растворенные в паре, между тем большая часть веществ при давлениях выше 80 *ата* присутствует в паре именно в форме раствора. Поэтому наряду с обычными сепарационными устройствами в котлах высокого и сверхвысокого давлений нашла применение *промывка пара* питательной водой или конденсатом.

Промывка пара основана на том, что растворимость различных нелетучих соединений в воде значительно больше растворимости их в паре. Поэтому при контакте последнего с водой содержащиеся в нем вещества переходят в водный раствор. Для осуществления промывки пара в барабане котла (рис. 4-14) на некотором расстоянии от зер-

кала испарения устанавливается паропромывочное устройство, показанное отдельно на том же рисунке. На него подается питательная вода или конденсат (при подводе его в барабан котла по отдельной схеме), сквозь слой (50—100 *мм*) которых и барботирует промываемый пар. Уносимые паром капельки концентрированной котловой воды остаются в промывочной воде, которая вымывает из

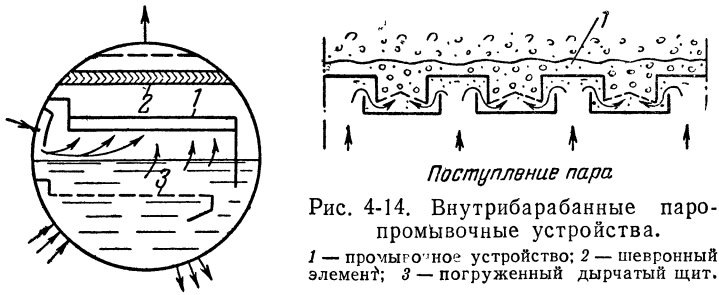


Рис. 4-14. Внутрибарабанные паропромывочные устройства.
1 — промывочное устройство; *2* — шевронный элемент; *3* — погруженный дырчатый щит.

пара растворенные в нем вещества и, в частности, кремниевую кислоту. Промывка пара, как показывает опыт, является весьма эффективным средством борьбы с загрязнением пара нелетучими веществами.

4-5. Продувка паровых котлов

Продувкой паровых котлов называют вывод из котла 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 имеет целью поддержание определенной концентрации котловой воды, периодическая продувка предназначена для вывода из котла шлама.

При помощи продувки устанавливается материальный баланс солей в котле, т. е. равенство их прихода и убыли. Рассмотрим количественную сторону этого баланса. В котел производительностью по питательной воде $D_{пв}$ [*т/ч*] поступает в час $S_{пв} D_{пв}$ [*г*] солей. За то же время из котла удаляется солей с паром $S_п D_п$ [*г*] и с продувочной водой $S_{кв} D_{пр}$ [*г*]. При установившемся режиме работы котла должно быть

$$S_{пв}D_{пв} = S_п D_п + S_{кв}D_{пр}. \qquad (4\text{-}9)$$

Здесь $S_{пв}$, $S_{кв}$ и $S_п$ обозначают не только величину солесодержания, но и концентрацию какого-либо вещества, по которому ведется расчет продувки (например, кремнесодержание), соответственно в питательной, котловой воде и паре.

Подставляя в это уравнение значение $D_{пв} = D_п + D_{пр}$ и решая его относительно количества выводимой из котла продувочной воды $D_{пр}$ [$т/ч$], найдем:

$$D_{пр} = \frac{S_{пв} - S_п}{S_{кв} - S_{пв}} D_п \text{ [}т/ч\text{]}, \tag{4-10}$$

откуда, разделив на $D_п$, получим относительную величину продувки в процентах от паропроизводительности котла (продувка по пару):

$$p_п = \frac{D_{пр}}{D_п} 100 = \frac{S_{пв} - S_п}{S_{кв} - S_{пв}} 100 \text{ [\%]}. \tag{4-10а}$$

Если же в уравнение (4-9) подставить значение $D_п = D_{пв} - D_{пр}$, получим другое выражение для величины продувки уже в процентах от количества питательной воды (продувка по питательной воде):

$$p_в = \frac{D_{пр}}{D_{пв}} 100 = \frac{S_{пв} - S_п}{S_{кв} - S_п} 100 \text{ [\%]}. \tag{4-11}$$

Формулы (4-10а) и (4-11) можно упростить, положив $S_п = 0$, тогда получим:

$$\left.\begin{aligned} p_п &= \frac{S_{пв}}{S_{кв} - S_{пв}} 100 \text{ [\%]} \\ \text{и} \\ p_в &= \frac{S_{пв}}{S_{кв}} 100 \text{ [\%]}. \end{aligned}\right\} \tag{4-12}$$

Такое упрощение допустимо, если численное значение $S_{пв}$ значительно больше $S_п$.

Формуле (4-10а) можно придать и другой вид. Имея в виду, что $S_п = УS_{кв}$ (см. § 4-1), где коэффициент выноса $У$ выражен в долях от единицы, уравнение баланса (4-9), составленное для 1 $т$ пара, примет следующий вид ($p_п$ выражено здесь в долях от единицы):

$$(1 + p_п) S_{пв} = (У + p_п) S_{кв}.$$

Из этого уравнения видно, что величиной $У$ (а следовательно, и $S_п$) можно пренебречь, когда ее значение весьма мало (не более 5%) по сравнению с $p_п$. Например, для котлов высокого давления коэффициент выноса $У$ по общему солесодержанию не превышает 0,05% и при $p_п = 1\%$ им можно пренебречь. Напротив, в расчетах по кремнекислоте $S_п$ уже пренебречь нельзя, так как $У \geq 1\%$.

При необходимости учитывать величину $У$ следует пользоваться точной формулой (4-10а), которая в этом случае примет вид:

$$p_п = \frac{S_{пв} - УS_{кв}}{S_{кв} - S_{пв}} 100\,[\%]. \tag{4-13}$$

Решая ее относительно $S_{пв}$, найдем:

$$S_{пв} = \frac{100У + p_п}{100 + p_п} S_{кв}\,[мг/л]. \tag{4-13а}$$

Подставляя в эту формулу $S_{кв} = \frac{S_п}{У}$, получим равенство:

$$S_{пв} = \frac{100У + p_п}{100 + p_п} \cdot \frac{S_п}{У}\,[мг/л], \tag{4-14}$$

устанавливающее связь между содержанием какого-либо вещества в паре и питательной воде. Если известно $У$, можем найти концентрацию кремниевой кислоты в паре по содержанию ее в питательной воде.

Поступающие в котел вещества удаляются из него двумя путями: часть $\varepsilon_п$ уносится паром:

$$\varepsilon_п = \frac{1}{1 + p_п} \frac{S_п \cdot 100}{S_{пв}} = \frac{1}{1 + p_п} У \frac{S_{кв}}{S_{пв}} 100\,[\%], \tag{4-15}$$

остальное количество $\varepsilon_в = 100 - \varepsilon_п$ — с продувочной водой. Величина $\varepsilon_п$ характеризует паровую продувку котла, которая иногда имеет большую величину.

Зная одну из величин $p_п$ или $p_в$, можно определить другую по формулам:

$$\left.\begin{aligned} p_п &= \frac{p_в}{100 - p_в} 100\,[\%] \\ \text{и} \qquad & \\ p_в &= \frac{p_п}{100 + p_п} 100\,[\%]. \end{aligned}\right\} \tag{4-16}$$

Для вновь проектируемых котельных установок качество питательной воды остается неизвестным и определение величины продувки по приведенным формулам оказывается затруднительным. В этом случае применяется формула

$$p_п = \frac{\Sigma П_о S_х}{S_{кв} - (1 - \beta) S_х} [\%], \qquad (4\text{-}17)$$

где $\Sigma П_о$ — суммарные потери конденсата, %;

β — доля отсепарированного в продувочном расширителе пара;

$S_х$ — солесодержание химически обработанной воды.

В нее входят величины, легко определяемые при проектировании.

Формула (4-17) получается на основе следующих рассуждений. Химически обработанной водой восполняются потери конденсата $П_к$ [*т/ч*] и продувочной воды. Выводимая из котла продувочная вода направляется в расширитель, где β долей ее превращается в пар и используется в цикле станции, а $(1 - \beta)$ долей теряется в виде воды. Поскольку в питательную систему котлов соли вносятся главным образом химически обработанной водой, можно написать следующее уравнение солевого баланса:

$$П_к S_х + D_п p_п (1 - \beta) S_х = D_п p_п S_{кв},$$

если $p_п$ выражено в долях. Левая часть характеризует количество солей, поступающих в котел с питательной водой, правая — количество их, удаляемое из него. Решая это уравнение относительно $p_п$ и умножая на 100, получим формулу (4-17), в которой $\Sigma П_о = \frac{П_к}{D_п} 100$ [%].

Величины концентраций веществ в питательной и котловой воде взаимосвязаны и могут быть определены из формул (4-18):

$$\left.\begin{aligned} S_{пв} &= \frac{p_п}{100 + p_п} S_{кв} \\ \text{и} \\ S_{кв} &= \frac{100 + p_п}{p_п} S_{пв}. \end{aligned}\right\} \qquad (4\text{-}18)$$

Если в питательную систему добавляется $\alpha_х$ долей химически обработанной воды с содержанием веществ $S_х$ [*мг/л*] (или *мг-экв/л*), то с достаточной точностью $S_{пв} = \alpha_х S_х$ (если $S_{пв}$ значительно превосходит содержание веществ в турбинном конденсате). Подставляя это значение $S_{пв}$

в первую из формул (4-18), получим выражение, устанавливающее связь между качеством химически обработанной воды и котловой водой:

$$S_x = \frac{p_n}{100 + p_n} \cdot \frac{S_{кв}}{\alpha_x}. \qquad (4\text{-}19)$$

Эта зависимость часто используется при выборе схемы водообработки при проектировании.

Для электростанций, безвозвратно отдающих пар на производство, нередко бывает важным вопрос, сколько тонн химически обработанной воды необходимо добавить в питательную систему котлов взамен 1 $т$ потерянного конденсата? Следует учесть, что безвозвратный расход пара увеличивается в осенне-зимний период. Поэтому в некоторых случаях важно знать потребность электростанций в химически обработанной воде Q_x $[т/ч]$ в период максимальной потери конденсата $П_к$ $[т/ч]$. Величину Q_x можно определить из балансового равенства

$$Q_x = П_к + D_{пр}(1 - \beta). \qquad (4\text{-}20)$$

Для котлов с давлением меньше 80 *ата* и при малом коэффициенте выноса $У$ можем считать, что все соли, вводимые в котел с химически обработанной водой, удаляются из него продувкой:

$$S_x Q_x = D_{пр} S_{кв}.$$

Определяя отсюда $D_{пр}$ и подставляя в равенство (4-20), получим:

$$Q_x = \frac{1}{1 - \frac{S_x}{S_{кв}}(1 - \beta)} П_к \ [т/ч]. \qquad (4\text{-}20а)$$

Коэффициент

$$k = \frac{1}{1 - \frac{S_x}{S_{кв}}(1 - \beta)} \qquad (4\text{-}20б)$$

показывает, что величина добавки Q_x зависит от отношения $S_x : S_{кв}$. Если $S_x \to 0$ (восполнение потерь конденсатом), $k \to 1$; при $S_x \to S_{кв}$ k сильно увеличивается и при $\beta = 0$ $k \to \infty$. Поэтому наиболее неблагоприятные условия в зимний период будут иметь место, когда увеличение потерь конденсата сочетается с повышением сухого остатка или щелочности исходной воды.

На практике водный режим котла определяется (лимитируется) каким-либо одним из следующих показателей качества котловой воды: щелочностью, солесодержанием и кремнесодержанием. Определяющим (лимитирующим) показателем является тот, по которому продувка котла получается наибольшей.

Обозначим максимально допустимую величину сухого остатка котловой воды $S^{д}_{кв}$ и щелочности $Щ^{д}_{кв}$. Тогда при данных сухом остатке $S_{пв}$ и щелочности $Щ_{пв}$ питательной воды могут быть следующие соотношения. Если

$$\frac{S^{д}_{кв}}{S_{пв}} = \frac{Щ^{д}_{кв}}{Щ_{кв}} = \frac{100 + p_п}{p_п}, \qquad (4\text{-}21)$$

режим котловой воды можно вести или по сухому остатку, или по щелочности (сравнительно редкий случай). Если же

$$\frac{S^{д}_{кв}}{S_{пв}} > \frac{Щ^{д}_{кв}}{Щ_{пв}} = \frac{100 + p_п}{p_п}, \qquad (4\text{-}21а)$$

определяющим показателем является щелочность котловой воды, по которой и ведется ее режим. В том случае, когда

$$\frac{Щ^{д}_{кв}}{Щ_{пв}} > \frac{S^{д}_{кв}}{S_{пв}} = \frac{100 + p_п}{p_п}, \qquad (4\text{-}21б)$$

режим котловой воды ведется по сухому остатку, являющемуся в этом случае лимитирующим.

Равенство (4-21а) можно написать и так:

$$\frac{S^{д}_{кв}}{Щ^{д}_{кв}} > \frac{S_{пв}}{Щ_{пв}} = \frac{100 + p_п}{p_п} \cdot \frac{S_{пв}}{Щ_{кв}}.$$

Из него следует, что условия (4-21), (4-21а) и (4-21б) будут неизменны и справедливы лишь при неизменной и определенной величине отношения $S_{пв} : Щ_{пв}$. Это значит, что если на данной электростанции оно непостоянно, нужно контролировать и $S_{кв}$ и $Щ_{кв}$, руководствуясь условиями (4-21а) или (4-21б) в зависимости от величины этого отношения. Несоблюдение этого может привести к броску котловой воды, что нередко и наблюдается на практике.

Согласно Правилам технической эксплуатации электростанций (ПТЭ) высшим пределом продувки является: 5% для ТЭЦ с безвозвратной отдачей пара на производство, 2% для ТЭЦ без отдачи пара на сторону и с восполнением потерь химически обработанной водой и 1% для конденсационных электростанций. Если расчетная или фактическая величина продувки превышает эти нормативы, необходимо применить специальные меры для ее снижения.

Непрерывная продувка котла может производиться по многим схемам. Одна из них, наиболее часто встречающаяся, представлена на рис. 4-15. Важным элементом схемы является регулировочный узел. Он должен быть надежным в работе и позволять достаточно точно регулировать величину продувки. На представленной схеме регулирование

ее осуществляется игольчатым вентилем *6*, а контроль величины продувки—по манометру *8*. Водозаборное устройство непрерывной продувки внутри барабана представляет собой трубу с отверстиями 8—10 *мм*, которая укладывается по длине барабана в месте *наибольшей* концентрации котловой воды.

В расширителе *3* поддерживается давление, значительно меньшее, чем в котле (обычно 0,7—1,5 *ати*). Часть котловой воды β, которая в силу этого испаряется в нем, может быть определена из выражения

$$\beta = \frac{i_0 - i_{св}}{i_п - i_{св}} 100\,[\%], \quad (4\text{-}22)$$

где i_0, $i_{св}$ $i_п$ — теплосодержание соответственно котловой и сепарированной в расширителе воды и пара, получаемого в нем, *ккал/кг*.

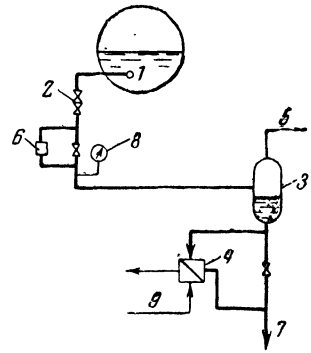


Рис. 4-15. Принципиальная схема непрерывной продувки.

1 — водоотборное устройство; *2* — запорные вентили; *3* — расширитель; *4* — теплообменник; *5* — пар в деаэратор; *6* — игольчатый вентиль; *7* — дренаж; *8* — манометр; *9* — нагреваемая вода.

Пар из расширителя большей частью подается в деаэратор, хотя может использоваться и на другие нужды. Сепарированная вода направляется в теплообменник *4*, где она отдает тепло химически обработанной или исходной воде, поступающей на водоподготовку.

При наличии в котельной двух групп котлов—высокого и среднего или среднего и низкого давлений—представляется возможность продувочную воду котлов более высокого давления (первой группы) направить непосредственно в барабаны котлов пониженного давления (второй группы). В этом случае отпадает необходимость в установке расширителей и теплообменников.

Количество продувочной воды котлов первой группы, которое можно направить по такой схеме в котлы второй группы, не является произвольным. Исходя из расчетной схемы рис. 4-16, можно составить следующее уравнение солевого баланса для котлов второй группы:

$$\varepsilon S'_{кв} + (1 - \varepsilon) S_{пв} = S''_{пв}, \quad (4\text{-}23)$$

где ε — величина доли питательной воды котлов второй группы, восполняемая продувочной водой котлов первой группы.

Из этого равенства получаем:

$$\varepsilon = \frac{S''_{пв} - S_{пв}}{S'_{кв} - S_{пв}}.$$

В свою очередь

$$S''_{пв} = \frac{p''_{п}}{100 + p''_{п}} S''_{кв},$$

где $p''_{п}$ — продувка котлов второй группы, %.

Продувочная вода непрерывной продувки может быть использована и на другие цели, в том числе на восполне-

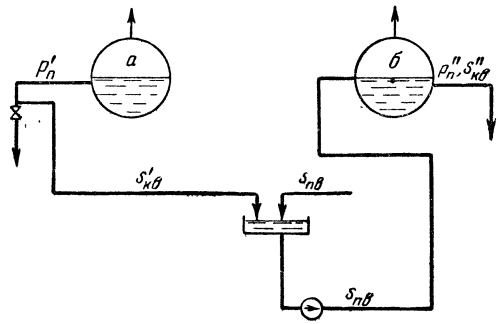


Рис. 4-16. Расчетная схема для случая использования котловой воды первой группы (*а*) в котлах второй группы (*б*).

ние потерь в теплофикационной системе, на питание испарителей и др.

Наряду с непрерывной производится также и периодическая продувка котлов. Она предназначена для удаления из котла шлама, который обычно скопляется в нижних точках котла—нижних барабанах, грязевиках, коллекторах экранов. С этих элементов котла и делается отбор воды для периодической продувки. Режим ее зависит от степени зашламления котла.

4-6. Вывод солей из цикла теплосиловой установки

В питательную систему котлов непрерывно поступают различные вещества, источником поступления которых могут быть: присосы охлаждающей воды в конденсаторах турбин; вода, добавляемая в питательную систему котлов для восполнения потерь (конденсат, дистиллят, химически обработанная вода); процессы коррозии, обогащающие

питательную воду; окислы металлов, образующиеся в результате коррозии водо-конденсатного тракта электростанции. Для устранения возможности накопления нелетучих веществ в цикле теплосиловой установки, которое обычно приводит к нарушению ее нормальной работы, необходимо систематически и в соответствующем размере выводить их из цикла.

Продувка барабанов котлов удовлетворительно решает эту задачу. Однако она может быть применена только для докритических параметров пара. В связи с этим вопрос

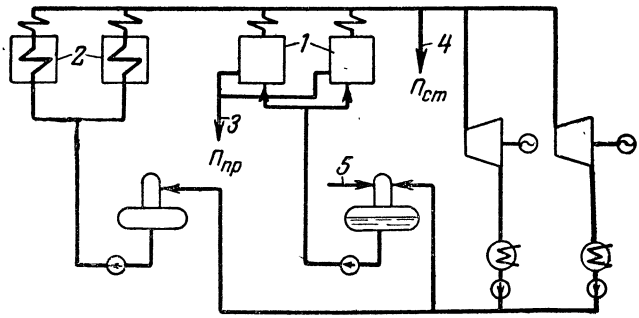


Рис. 4-17. Принципиальная схема разомкнутого пароводяного цикла.

вывода нелетучих веществ из цикла паросиловой установки критических и сверхкритических параметров приобретает большой практический интерес, поскольку такие установки, оборудованные прямоточными котлами, в недалеком будущем получат широкое распространение.

Пароводяной цикл теплосиловой установки может быть построен по двум схемам. На рис. 4-17 представлена разомкнутая схема пароводяного цикла электростанции, оборудованной барабанными *1* и прямоточными *2* котлами. Вывод веществ из цикла здесь осуществляется продувкой *3* барабанных котлов и потерями пара *4*. Добавляемая вода *5* вводится в питательную систему барабанных котлов, а прямоточные котлы работают на чистом конденсате.

Для современных мощных электростанций характерно внедрение блочных схем, в которых котел и турбина связываются в единый изолированный комплекс с самостоятельным пароводяным циклом (рис. 4-18). Блочная установка на критические и сверхкритические параметры является замкнутой, поскольку отсутствует основной вывод

солей из цикла — «продувка котла». Взамен ее могут быть предложены другие способы вывода веществ из пароводяного цикла, а именно:

1) Вещества могут оставаться в котле в виде отложений, откуда они периодически будут удаляться промывкой.

2) Они могут удаляться из цикла путем обесссоливания всего или части турбинного конденсата, т. е. путем удаления из конденсата растворенных в нем веществ специальными методами.

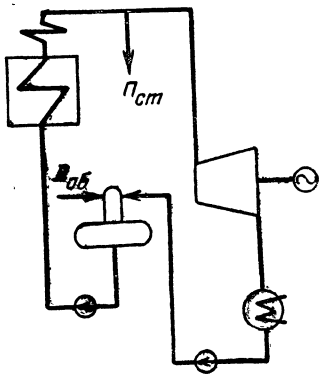


Рис. 4-18. Принципиальная схема замкнутого пароводяного цикла.

3) Вещества могут вымываться водой из пара низких давлений (после турбины или из ее регенеративных отборов) и выводиться из цикла с отделяемой влагой.

Первый способ, рассчитанный на оседание веществ в котле, для установок критических параметров оказывается неэффективным, так как большая часть веществ будет проходить котел транзитом вследствие их высокой растворимости в паре этих параметров. Занос же проточной части турбин недопустим, поскольку он обусловливает снижение экономичности работы турбины.

Второй способ, связанный с обессоливанием конденсата турбин, практически осуществим, но является приемлемым лишь при условии обессоливания небольшой доли конденсата. В этом случае значительно возрастают требования к качеству обессоленного конденсата.

Если обозначить солесодержание турбинного конденсата S_m, обессоленного S_o, питательной воды $S_{пв}$ и долю турбинного конденсата, направляемую на обессоливание Z, то относительная глубина обессоливания $S_o : S_{пв}$ будет равна:

$$\frac{S_o}{S_{пв}} = \frac{1}{Z}\left[1 - \frac{S_m}{S_{пв}}(1 - Z)\right]. \qquad (4\text{-}24)$$

Следует учесть, что S_o имеет своим пределом примерно 40—50 *мкг/кг*, а $S_{пв}$ не должно быть выше 100 — 150 *мкг/кг*.

Практическое осуществление третьего способа может быть выполнено следующим образом. Влажный (или специально увлажненный) пар из последних отборов турбины направляется в специальные сепараторы для отделения влаги, в которой растворены вымытые из пара вещества. Отделенная в сепараторах влага, которая, по существу, является конденсатом, может быть направлена на обессоливающую установку, после которой она вновь возвращается в пароводяной цикл. Таким образом, получается своего рода непрерывная продувка турбины. Если влажность пара равна $(1-x)$, то концентрация веществ в сепарируемой влаге $S_{св}$ будет равна:

$$S_{св}=\frac{S_п}{(1-x)}\ [мг/л]. \qquad (4\text{-}25)$$

Продувка турбин может оказаться эффективным средством выведения нелетучих веществ из замкнутого пароводяного цикла, если будут разработаны способы увлажнения пара и сепарации из него влаги.

4-7. Ступенчатое испарение

Ступенчатое испарение воды в котлах как средство получения чистого пара было предложено проф. Роммом (ВТИ) в 1936 г. С тех пор работами ряда организаций (ОРГРЭС, ВТИ, ЦКТИ, Энергочермет) оно непрерывно совершенствовалось и в настоящее время твердо вошло в практику котлостроения. 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 котла, т. е. (см. § 4-1)

$$S_п=yS_{кв}.$$

Так как величина y для данного котла при установившемся режиме его работы является примерно постоянной, то единственная возможность уменьшить $S_п$ заключается в снижении концентрации веществ в котловой воде $S_{кв}$. Однако это снижение $S_{кв}$ можно произвести различными путями. Для выяснения наиболее целесообразного из них рассмотрим уравнение баланса нелетучих веществ в котле (4-9). Пренебрегая величиной $S_п$, можем написать:

$$S_{кв}=\frac{S_{пв}D_{пв}}{D_{пр}}, \qquad (4\text{-}26)$$

или, подставляя значение $S_{кв}$ в равенство (4-1):

$$S_п = У \frac{S_{пв} D_{пв}}{D_{пр}} . \qquad (4\text{-}27)$$

Из этого равенства следует, что минимальное значение $S_п$ может быть достигнуто либо уменьшением концентрации веществ в питательной воде $S_{пв}$, либо увеличением продувки котла. Снижение $D_{пв}$ недопустимо, так как это означает уменьшение нагрузки котла.

Уменьшения $S_{пв}$ возможно достигнуть двумя путями: специальной обработкой (обессоливанием, § 12-2) добавляемой воды, позволяющей снизить ее солесодержание и щелочность; уменьшением величины добавки химически обработанной воды в питательную систему котлов.

Обессоливание является пока дорогим способом обработки, который к тому же применим не во всех случаях. Уменьшение величины добавки на действующей станции сопряжено с увеличением конденсатной или дистиллятной составляющей питательной воды, что во многих случаях оказывается невозможным. Поэтому для снижения величины $S_п$ на практике большей частью прибегают к увеличению продувки котла. Однако для обычных котлов, не оборудованных ступенчатым испарением, увеличение продувки имеет свой предел ($\leqslant 5\%$), связано с большими потерями тепла и не всегда возможно по условиям эксплуатации.

Снижение $S_{кв}$ за счет больших значений $D_{пр}$ оказывается возможным и приемлемым, если испарение воды в котле организовать по ступенчатой схеме. На рис. 4-19 представлены схемы циркуляции котловой воды обычного котла и котла, 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*. Питательная вода поступает в большой отсек, называемый *чистым отсеком* или *первой ступенью* испарения. Котловая вода чистого отсека служит питательной для *второй ступени* испарения, называемой *соленым отсеком*. Продувка котла осуществляется только из соленых отсеков.

Таким образом, ступенчатое испарение основано на создании различных солевых концентраций котловой воды в

циркуляционных контурах котла, образующих чистый и соленые отсеки. Важной особенностью ступенчатого испарения является то, что бóльшая часть пара получается из котловой воды чистого отсека, обладающей значительно меньшим солесодержанием, чем продувочная вода. Отсюда

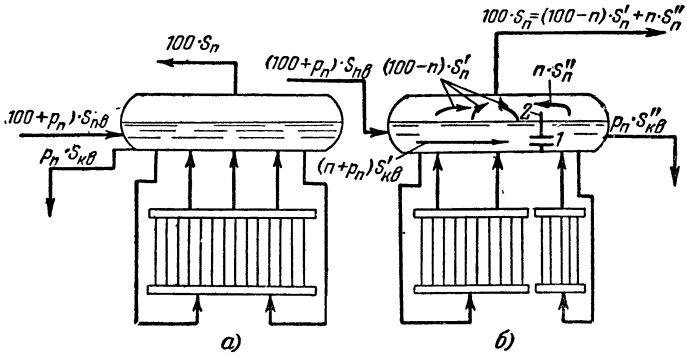


Рис. 4-19. Схемы циркуляции котловой воды в котлах без ступенчатого испарения (*а*) и оборудованного двухступенчатым испарением (*б*).

следует, что качество котловой воды чистого отсека является основным показателем надежности водного режима котла.

Условимся величины, относящиеся к чистому отсеку, отмечать одним штрихом, к соленому — двумя и к котлу в целом оставлять без штрихов. Тогда по аналогии с (4-27) можем написать:

$$S'_п = У' \frac{S_{пв} D_{пв}}{D'_{пр}} \; ; \; S''_п = У'' \frac{S'_{кв}(п+p_п)D_{пв}}{D''_{пр}}$$

и

$$S_п = У \frac{S_{пв} D_{пв}}{D_{пр}} ,$$

причем $S_{пв} = S'_{кв}(п + p_п)$. Произведение $S_{кв}D_{пв}$ характеризует часовое количество веществ, поступающее в котел, и для данного котла является величиной постоянной. При расчетах по общему солесодержанию для котлов давлением < 140 *ата* можно принять $У' \approx У'' \approx У$. Так как $D'_{пр} \gg D''_{пр}$ и $D''_{пр} = D_{пр}$, то из этих равенств следует, что $S'_п \ll S''_п = S_п$, т. е. качество пара чистого отсека в данном котле значительно лучше пара соленого отсека.

Вторая ступень испарения (паропроизводительность которой выражается обычно в процентах от $D_п$ и обозначается n) выдает пар такого же качества, как и котел без ступенчатого испарения при той же величине $p_п$. Поскольку, однако, количество пара, вырабатываемого первой ступенью, в $(100 - n) : n$ раз больше количества пара, получаемого с соленого отсека, то качество пара котла со ступенчатым испарением также выше, чем у одноступенчатого котла при одинаковых других условиях. Это свойство ступенчатого испарения является весьма ценным в условиях ухудшенного качества питательной воды.

Для выведения нижеследующих зависимостей удобно паропроизводительность котла принять равной 100 *т/ч*. Тогда численное значение $p_п$ и n будут обозначать как проценты, так и *т/ч*. Для котла с двумя ступенями испарения можно написать следующие уравнения баланса примесей:

для котла в целом

$$(100 + p_п) S_{пв} = 100 S_п + p_п S''_{кв}; \tag{4-28}$$

для чистого отсека

$$(100 + p_п) S_{пв} = (100 - n) S'_п + (n + p_п) S'_{кв}.$$

Подставляя $S'_п = У' S'_{кв}$, получим:

$$(100 + p_п) S_{пв} = (100 - n) У' S'_{кв} + (n + p_п) S'_{кв},$$

откуда

$$S'_{кв} = \frac{100 + p_п}{n + p_п + (100 - n) У'} S_{пв}. \tag{4-29}$$

Величиной $(100 - n) У'$ как весьма малой по сравнению с $(n + p_п)$ можно пренебречь, тогда

$$S'_{кв} = \frac{100 + p_п}{n + p_п} S_{пв}. \tag{4-30}$$

Для соленого отсека

$$(n + p_п) S'_{кв} = n S''_п + p_п S''_{кв}. \tag{4-31}$$

Так как $S''_п = У'' S''_{кв}$, то

$$(n + p_п) S'_{кв} = (n У'' + p_п) S''_{кв},$$

откуда уже

$$S''_{кв} = \frac{n + p_п}{n У'' + p_п} S'_{кв}. \tag{4-32}$$

При малых значениях $У''$ и n произведением $nУ''$ можно пренебречь, тогда

$$S''_{кв}=\frac{n+p_n}{p_n}\,S'_{кв}. \qquad (4\text{-}33)$$

Уравнение баланса примесей в паре:

$$100S_n=(100-n)\,S'_n+nS''_n, \qquad (4\text{-}34)$$

откуда

$$S_n=\left(1-\frac{n}{100}\right)S'_n+\frac{n}{100}\,S''_n. \qquad (4\text{-}34а)$$

Оценку схемы ступенчатого испарения обычно производят по величине отношения сухого остатка (щелочности, кремнесодержания) котловой воды последней ступени испарения к первой. Например, для двухступенчатой схемы

$$K_к=\frac{S''_{кв}}{S'_{кв}}. \qquad (4\text{-}35)$$

Оно называется *кратностью концентраций*. Чем выше $K_к$, тем экономичнее схема. На практике величина $K_к$ ограничивается чаще всего пределами $3\div10$. При $K_к>10$ в соленом отсеке может создаться высокая концентрация котловой воды, опасная с точки зрения образований отложений. Из выражения (4-32) находим:

$$K_к=\frac{n+p_n}{nУ''+p_n}, \qquad (4\text{-}36)$$

откуда

$$n=\frac{K_к-1}{1-K_кУ''}\,p_n. \qquad (4\text{-}37)$$

Произведение $K_кУ''$ не превышает $0{,}08-0{,}1$, поэтому в ряде случаев им можно пренебречь и считать по упрощенной формуле:

$$n=(K-1)\,p_n. \qquad (4\text{-}35а)$$

Снижение величины $K_к$, а следовательно, и экономичности ступенчатого испарения происходит по ряду причин. Одна из них заключается в том, что в процессе работы котла в чистый отсек попадает котловая вода соленого отсека. Такое явление называется *перебросом*

котловой воды. Если обозначить величину переброса в процентах от $D_п$ через $r_п$, то приведенные формулы (4-30) и (4-32) примут следующий вид:

$$S'_{кв}=\frac{(100+p_п)\,S_{пв}+r_п S''_{кв}}{n+p_п+r_п} \tag{4-38}$$

и

$$S''_{кв}=\frac{r_п+n+p_п}{r_п+p_п}\,S'_{кв}. \tag{4-39}$$

Эффективность ступенчатого испарения характеризуется также относительным количеством (%) примесей, удаляемых из котла с паром $\varepsilon_п$ и продувочной водой $\varepsilon_в$. Для котла без ступенчатого испарения

$$\varepsilon^0_п=\frac{S_п}{(100+p_п)\,S_{пв}}\,100\ [\%]. \tag{4-40}$$

При оборудовании котла двухступенчатым испарением

$$\varepsilon_п=\varepsilon'_п+\varepsilon''_п=\frac{(100-n)\,S'_п+nS''_п}{(100+p_п)\,S_{пв}}. \tag{4-41}$$

Эффективность схемы ступенчатого испарения тем выше, чем $\varepsilon_п<\varepsilon^0_п$.

Рассмотрим численный пример для котла, характеризующегося следующими значениями величин: $D_п=100$ *т/ч*, $D_{пр}=5$ *т/ч*, n=20%, $S_{пв}=200$ *мг/л*, $У=0{,}02$%, $P=35$ *ата*, $S_п$ не должно превышать 0,3 *мг/л*. Вначале найдем качество пара, вырабатываемое котлом без ступенчатого испарения, для чего воспользуемся формулой

$$S_п=У\frac{S_{пв}D_{пв}}{D_{пр}}=\frac{2\cdot10^{-4}\cdot200\cdot105}{5}=0{,}84\ мг/л.$$

Солесодержание пара получается весьма высоким. Требуемое качество пара 0,3 *мг/л* можно получить лишь при производительности котла

$$D_п=D_{пв}-D_{пр}=\frac{D_{пр}S_п}{У\cdot200}-D_{пр}=\frac{5\cdot0{,}3}{2\cdot10^{-4}\cdot200}-5\cong32{,}5\ т/ч.$$

Поскольку нет возможности уменьшить $S_{пв}$ из-за недостатка конденсата, наиболее удовлетворительным решением в этом случае будет оборудование котла двухступенчатым испарением. Тогда будем иметь:

$$S'_{кв}=\frac{105}{25}\,200=840\ мг/л \text{ и } S'_п=У'S''_{кв}=$$

$$=2\cdot10^{-4}\cdot840=0{,}168\ мг/л;$$

$$S''_{кв} = \frac{25}{5} 840 = 4\,200 \text{ мг/л и } S''_{п} = У'' S''_{кв} =$$

$$= 2 \cdot 10^{-4} \cdot 4\,200 = 0{,}84 \text{ мг/л};$$

$$S_{п} = 0{,}8 \cdot 0{,}168 + 0{,}2 \cdot 0{,}84 = 0{,}3 \text{ мг/л}.$$

В этом примере принято $У = У' = У''$. Таким образом, ступенчатое испарение позволяет снять ограничения нагрузки котла по условию качества пара.

Конструктивно соленые отсеки располагаются как внутри барабана, так и вне его. Внутри барабана соленые отсеки чаще всего располагаются у его торцов (рис. 4-20). Недостатком такого расположения является двусторонняя продувка котла, что усложняет химический контроль его водного режима. Наличие переброса котловой воды соленых отсеков в чистые через перегородки является вторым недостатком этой схемы. Полное устранение переброса достигается в схемах с солеными отсеками, вынесенными из барабана. Такие схемы разработаны ОРГРЭС (инж. В. Н. Ноев) и нашли широкое распространение под названием схем *с выносными циклонами* (рис. 4-21).

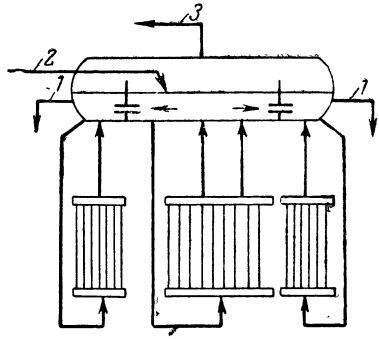


Рис. 4-20. Схема двустороннего расположения соленых отсеков в барабане котла.
1 — продувка; *2* — питательная вода; *3* — пар.

Рядом с барабаном *1* устанавливаются циклоны *2*, к которым подключаются экранные поверхности котла (обычно часть боковых экранов) *3*. Питательная вода *4* поступает в барабан (чистый отсек), из которого и осуществляется питание циклонов. Циклоны (для мощных котлов они обычно устанавливаются «батареями» по три—четыре в каждой) вместе с подключенными к ним экранами образуют самостоятельные контуры циркуляции. Пар из циклона направляется в барабан (последовательное включение циклонов) или непосредственно в пароперегреватель (пунктир, параллельная схема), если качество пара достаточно высокое. Продувка котла осуществляется из циклонов. Схема с выносными циклонами позволяет частично разгрузить паровой объем барабана, что способствует улучшению качества пара. На рис. 4-22 представлена схема трехступенчатого испарения с выносными циклонами.

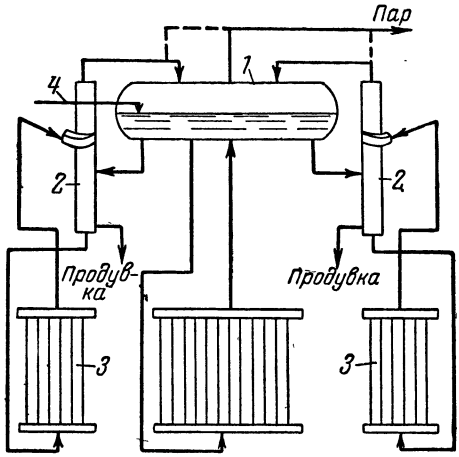


Рис. 4-21. Схема двухступенчатого испарения с выносными циклонами.

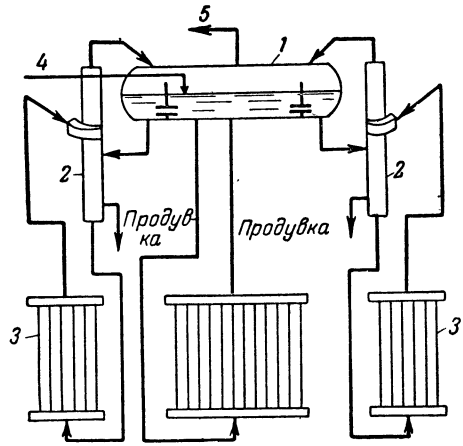


Рис. 4-22. Схема трехступенчатого испарения с выносными циклонами (парогенерирующая поверхность нагрева, подсоединенная ко второй ступени испарения, условно не показана).

Глава пятая

КОРРОЗИЯ ПАРОСИЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ И БОРЬБА С НЕЙ

5-1. Сущность и формы проявления коррозии металлов

Коррозией металлов называется разрушение их под воздействием окружающей среды (в энергетике—воды, пара, топочных газов) в результате химических и электрохимических процессов, протекающих на поверхности металла. Разрушение поверхности металла, вызванное действием механических процессов (трением, ударом), называется *эрозией.*

Формы проявления коррозии разнообразны. Различают коррозию *равномерную и неравномерную или местную.* Равномерная коррозия характеризуется разрушением металла по всей поверхности примерно на одинаковую глубину. Неравномерная коррозия подразделяется на коррозию пятнами, язвенную, точками, избирательную и межкристаллитную. При язвенной и тем более при точечной коррозии разрушения сильно развиты в глубину. Это наиболее нежелательный вид коррозии, так как незначительная потеря металла может привести к выходу оборудования из строя. Избирательная коррозия отличается тем, что разрушается какая-то одна составляющая сплава, например в сплаве меди с цинком (латунь) разрушается цинк. Этот вид коррозии наиболее часто встречается в конденсаторах турбин, в которых латунные трубки обесцинковываются при охлаждении их минерализованной или морской водой. Латунь, лишенная цинка, делается хрупкой.

Химическая коррозия обусловливается чисто химическими процессами и имеет место при непосредственном взаимодействии металла с окружающей средой, которое не сопровождается электрическим током. Отличительной особенностью химической коррозии является то, что продукты коррозии образуются непосредственно на участках поверхности, вступающих в реакцию. В качестве примера такой коррозии может служить окисление металла водяным паром при температурах выше 450—500° С:

$$3Fe + 4H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 4H_2.$$

Электрохимическая коррозия наиболее часто встречается в практике эксплуатации электростанций. Она возни-

кает при воздействии на металл растворов электролитов и характеризуется протеканием электрического тока от одной части металла к другой.

Для выяснения сущности электрохимического процесса коррозии рассмотрим схему обычного гальванического медноцинкового элемента (рис. 5-1). В нем пластинки цинка и меди погружены в раствор соответственно $ZnSO_4$ и $CuSO_4$. Разрушению (т. е. коррозии) подвергается цинковая пластинка. Оно состоит в том, что цинк переходит в раствор в виде иона, оставляя свободные электроны в пластинке (анодный процесс):

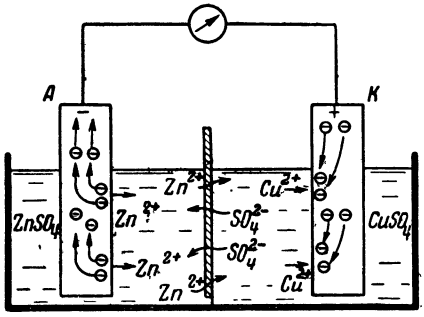


Рис. 5-1. Схема медно-цинкового гальванического элемента.

$$Zn - 2e \rightarrow Zn^{2+}.$$

Если теперь соединить металлическим проводником обе пластинки (электроды), то свободные электроны с цинка (анода) сейчас же перейдут на медную пластинку (катод). Здесь они будут связываться ионами меди, которые при этом восстанавливаются и выделяются на медной пластинке (катодный процесс):

$$Cu^{2+} + 2e \rightarrow Cu.$$

Анодный и катодный процессы дополняются переходом электронов от анода к катоду и движением ионов в электролите — анионов к аноду и катионов к катоду. Таким образом, в этом элементе протекает химическая реакция, в результате которой цинк отдает электроны (реакция окисления — анодный процесс), а ионы меди их принимают (реакция восстановления — катодный процесс):

$$Zn + Cu^{2+} \rightarrow Zn^{2+} + Cu.$$

Количество переходящих с анода на катод электронов (т. е. ток I) пропорционально количеству ионов цинка, перешедших в раствор; чем больше I, тем интенсивнее коррозия. Так как

$$I = \frac{V_к - V_A}{R},$$

где $V_к$, V_A — потенциалы катода и анода, то интенсивность в значительной мере определяется разностью потенциалов электродов $V_к - V_A$ (потенциал анода всегда меньше потенциала катода) при данном R. Как показывает опыт, разность $V_к - V_A$ оказывается значительной в начальный момент работы коррозионного элемента и уменьшается до некоторой величины в последующем. Уменьшение начальной разности потенциалов электродов гальванического коррозионного элемента, приводящее к уменьшению интенсивности коррозии, называется *поляризацией*.

Электродные процессы, уменьшающие поляризацию, т. е. интенсифицирующие коррозию, называются *деполяризацией*, а вещества или факторы, способствующие деполяризации, — *деполяризаторами*. Следовательно, одним из условий возникновения и протекания коррозии является наличие деполяризаторов, в частности веществ, способных связывать свободные электроны..

Условие $V_к = V_A$ приводит к прекращению электрохимической коррозии. Оно означает полную электрохимическую однородность поверхности металла, т. е. отсутствие гальванической пары. Прекращение коррозии наступает также и в случае $R = \infty$, что означает отсутствие электролита, являющегося проводником второго рода.

Таким образом, для возникновения и протекания электрохимической коррозии металла необходимо наличие следующих трех основных условий: *гальванической пары*, т. е. двух участков металла с разными потенциалами; *электролита*, находящегося в контакте с электродами гальванической пары, и *деполяризаторов*. Устранение одного из этих условий делает электрохимическую коррозию невозможной, что широко и используется на практике.

В металле, например в стенке стальной котельной трубы, образование гальванических пар обусловливается электрохимической неоднородностью различных участков поверхности. Вследствие ряда причин потенциалы одних участков становятся более отрицательными, чем потенциалы других. В таком случае возникают уже рассмотренные процессы, ведущие к разрушению анодных участков (рис. 5-2).

В условиях водного режима электростанций роль деполяризаторов катодных участков чаще всего выполняют растворенный в воде кислород (кислородная деполяризация)

$$O_2 + 4e + 2H_2O \rightarrow 4OH^- \qquad (5\text{-}1)$$

или ионы водорода (водородная деполяризация)

$$2H^+ + 2e \rightarrow 2H \rightarrow H_2. \qquad (5\text{-}2)$$

Как показывает опыт эксплуатации, роль деполяризатора могут выполнять также и нитриты, т. е. соли азотистой кислоты $NaNO_2$ Наиболее вероятное течение процесса может быть описано следующей реакцией:

$$NO_2^- + H_2O + e \rightarrow \uparrow NO + 2OH^-, \qquad (5\text{-}3)$$

или

$$3NaNO_2 + Fe + 3H_2O \rightarrow 3\uparrow NO + Fe(OH)_3 + 3NaOH. \qquad (5\text{-}3а)$$

Нитриты появляются в воде в результате жизнедеятельности нитрифицирующих бактерий, окисляющих аммиак до NO_2^- или NO_3^-.

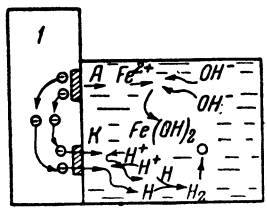


Рис. 5-2. Схема электрохимической коррозии металла.

1 — стенка трубы; *A* — анодный участок; *K* — катодный участок.

Поэтому основной причиной загрязнения воды нитритами является поступление в источник воды промышленных стоков, содержащих аммиак или нитриты, а также разложение органических веществ, содержащихся в воде. Нитрифицирующие бактерии могут поселяться в трубопроводах и механических фильтрах водоочисток, что обусловливает увеличение концентрации нитритов в цикле водообработки. Борьба с этим явлением ведется периодическим хлорированием трубопроводов и аппаратуры, зараженных бактериями.

Содержание в речных водах нитратов NO_3^- невелико — для незагрязненных рек до 0,1—0,5 *мг/л* NO_3^-. В малых реках, в которые стекают воды с пашен, а также сточные воды населенных мест, содержание NO_3^- может достигать 10 *мг/л*. Минимальное содержание NO_3^- отмечается в летний период, во время которого ионы NO_3^- потребляются водными растениями.

Содержание нитритных ионов в речной воде значительно меньше, чем нитратных, — до 0,01 *мг* $NO_2^-/л$, увеличиваясь в загрязненных реках до 0,05 *мг* $NO_2^-/л$. Количество NH_4^+ обычно не превышает 0,1 *мг* $NH_4^+/л$, а в загрязненных водах — до 1 *мг/л*.

5-2. Основные факторы коррозии

В условиях работ теплосилового оборудования электростанций растворенный в воде кислород является основным фактором, определяющим интенсивность коррозии. Он является деполяризатором и, следовательно, обеспечивает работу коррозионных элементов.

Результатом коррозии железа с участием кислорода является образование вначале гидрата двухвалентного железа:

$$2Fe - 4e \rightarrow 2Fe^{2+} \quad \text{(анодный процесс)},$$

$$O_2 + 4e + 2H_2O \rightarrow 4OH^- \quad \text{(катодный процесс)}, \quad (5\text{-}4)$$

$$2Fe + O_2 + 2H_2O \rightarrow 2Fe(OH)_2.$$

При наличии в воде растворенного кислорода гидрат закиси переходит в весьма труднорастворимый гидрат окиси:

$$2Fe(OH)_2 + \frac{1}{2}O_2 + H_2O \rightarrow 2Fe(OH)_3. \quad (5\text{-}5)$$

Тем самым уменьшается концентрация ионов железа в растворе у анода, а это интенсифицирует коррозию за счет уменьшения поляризации анода.

Особенностью коррозии с участием кислорода (кислородной коррозии) в нейтральной или щелочной среде является образование язвин, т. е. резко выраженный местный (локальный) характер коррозии. Продукты коррозии обладают бóльшим объемом, чем железо, из которого они образуются. Поэтому над углублениями при локальной коррозии нередко возникают бугорки, служащие признаком повреждения металла язвенной коррозией. При pH<7 кислородная коррозия обычно имеет равномерный характер.

Значение характера коррозионных повреждений видно из следующего примера. По действующим нормативам допускаемое содержание кислорода в питательной воде равно 0,03 *мг/л*. Если котел производительностью 150 *т/ч* и поверхностью нагрева 1 500 *м*² будет питаться водой с таким содержанием кислорода, то за 8 000 *ч* его работы в нем может образоваться около 120 000 язвин в виде конуса с основанием 10 *мм* и высотой 3,5 *мм*, что полностью выведет котел из строя (подсчет сделан в предположении, что весь кислород расходуется на коррозию металла). При равномерной же коррозии с охватом всей поверхности котла при тех же условиях мог бы быть разрушен слой металла всего 0,017 *мм*, что никакого значения не имело бы для работы котла.

Кислород поступает в воду из воздуха. Поэтому обескислороженная вода или конденсат должны тщательно изолироваться от атмосферы. Вторым важным фактором, влияющим на процесс коррозии, является наличие в воде свободной углекислоты. Она препятствует образованию на поверхности металла защитного слоя продуктов коррозии,

вследствие чего скорость коррозии не уменьшается с течением времени.

Продукты коррозии, возникающие на поверхности разрушаемого металла, если они прочно с ним связаны и образуют достаточно плотный слой, могут в значительной мере снизить интенсивность коррозии или вовсе ее прекратить. В этом случае они уподобляются слою антикоррозионного покрытия, изолирующего металл от коррозионной среды или препятствующего прониканию к нему деполяризаторов.

В присутствии CO_2 продукты коррозии стали оказываются слабо связанными с металлом и поэтому уносятся потоком воды в котлы, где они образуют опасные отложения шлама. Угольная кислота понижает pH воды вследствие ее диссоциации

$$CO_2 + H_2O \rightarrow H_2CO_3 \rightarrow H^+ + HCO_3^-. \qquad (5\text{-}6)$$

При отсутствии в воде буферных соединений, как, например, в конденсате турбин и дистилляте, концентрация CO_2 в количестве всего 0,3 *мг/л* вызывает понижение pH до 5,5. Поэтому обогащение конденсата углекислотой создает благоприятные условия для протекания коррозии конденсатопроводов и, тем самым, загрязнения питательной воды продуктами коррозии.

5-3. Коррозия водоконденсатного тракта электростанции

В условиях водного режима электростанции наблюдаются случаи коррозионного повреждения питательных трубопроводов, стальных водяных экономайзеров, подогревателей и теплообменников регенеративного цикла и конденсатопроводов «обратного» (возвращаемого в котлы) конденсата.

Участок питательного тракта от деаэратора до барабана котла омывается все время свежей горячей (100—250° С) водой, которая контактирует с металлом, обычно лишенным отложений. Эти условия благоприятствуют развитию коррозии, если в питательной воде имеются деполяризаторы.

Температура ускоряет процессы коррозии, если имеются условия для их протекания. Однако характер этого ускорения зависит от того, нагревается ли вода, содержащая кислород, в закрытом теплообменнике или в баке,

сообщающемся с атмосферой (открытая схема) (рис. 5-3). В первом случае интенсивность коррозии непрерывно увеличивается с ростом температуры воды. В открытых системах интенсивность ее достигает максимума при 75—85° С.

Стальные водяные экономайзеры котлов наиболее часто повреждаются коррозией, если питательная вода содержит растворенный кислород. В таких случаях, как показывает опыт, экономайзеры выходят из строя по причине коррозии через два-три года после их установки, чему благоприятствуют высокая температура воды и большая поверхность, омываемая ею.

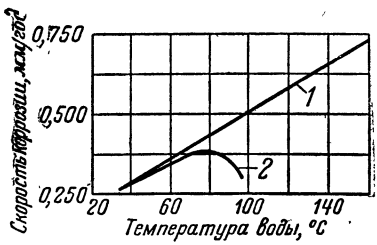


Рис. 5-3. Зависимость скорости коррозии от температуры.
1 — замкнутая система; *2* — открытая система.

Непосредственным результатом кислородной коррозии стальных экономайзеров является образование в них свищей, через которые может выходить (выбивать) тонкая струя воды. Подобные струи, направленные на стенку соседней трубы, способны изнашивать (перерезать) ее вплоть до образования сквозных отверстий. Чугунные экономайзеры кислородной коррозией не повреждаются.

Коррозия питательных трубопроводов проявляется также в образовании свищей, иногда приводящих к разрыву трубы.

Коррозия подогревателей и испарителей наблюдается со стороны греющего пара и вызывается главным образом содержанием в конденсате растворенной CO_2. При конденсации в подогревателе греющего пара содержащиеся в нем газы будут в каком-то количестве переходить в водный раствор. Это количество будет тем больше, чем выше парциальное давление этих газов и чем ниже температура конденсата по сравнению с температурой насыщения при данном давлении. Условия, благоприятные для обогащения конденсата газами (CO_2, O_2), создаются в случаях, когда газы не отводятся или недостаточно отводятся из парового объема подогревателей, т. е. при недостаточной вентиляции этого объема. Существенным при этом является положение уровня конденсата: если он высок и часть поверхности трубок оказывается погруженной в конденсат

(подтопленной), то температура конденсата становится меньше температуры насыщения. Такое явление называется *переохлаждением* конденсата. Оно увеличивает растворимость в конденсате газов, в том числе и CO_2.

В конденсаторах турбин неконденсирующиеся газы удаляются эжекторами. Тем не менее часть CO_2 переходит в конденсат, понижая его pH. Если имеют место переохлаждение конденсата и высокое содержание углекислоты в паре, поступающем в конденсатор, концентрация CO_2 в конденсате может оказаться достаточно высокой, чтобы вызвать интенсивную коррозию конденсатопроводов.

В пароводяной цикл теплосиловой установки углекислота поступает с химически обработанной водой и присосами охлаждающей воды в конденсаторах турбин. В обоих случаях в систему вносятся ионы HCO_3^- и CO_3^{2-}, которые в котле распадаются с образованием CO_2.

Количество углекислоты, поступающее в питательную систему котлов с химически обработанной водой, в значительной мере зависит от способа ее обработки. Все существующие схемы водоподготовительных установок можно разделить на две группы: установки, умягчающие воду без снижения концентрации ионов HCO_3^-, и установки, обеспечивающие такое снижение (декарбонизационные установки). Последние обеспечивают необходимое снижение содержания углекислоты в пароконденсатном цикле электростанции и могут рассматриваться как одно из основных средств борьбы с углекислотной коррозией. Необходимость в применении этих схем определяется рядом условий, подробно рассматриваемых в § 11-1, 11-2. Практике известны случаи, когда установка водоочистки первой группы вместо второй приводила к интенсивной углекислотной коррозии конденсатного тракта с выходом из строя регенеративных подогревателей. Поэтому при выборе схемы водоочистки всегда необходимо иметь в виду вопросы, связанные с загрязнением пара углекислотой.

Наиболее вредным результатом углекислотной коррозии является загрязнение питательной воды окислами железа. Оно увеличивается с повышением температуры воды и длительностью контакта с конденсатом, обогащенным CO_2.

Методы борьбы с коррозией питательного и пароконденсатного тракта станции основываются на удалении из питательной воды и конденсата агрессивных газов — кислорода и углекислоты. Углекислотная коррозия может быть в значительной мере устранена путем проведения следующих мероприятий:

а) Уменьшение количества свободной CO_2 в паре, что достигается применением соответствующих способов обработки добавляемой воды.

б) Правильный отвод из подогревателей конденсата греющего пара, при котором исключаются подтопление трубной системы и переохлаждение конденсата.

в) Полный отвод неконденсирующихся газов из парового пространства подогревателей.

Для полного связывания углекислоты, содержащейся в конденсате, наряду с этими мероприятиями применяют аммини рование, т. е. ввод в питательную воду аммиака. В котле аммиак переходит в пар, при конденсации которого в подогревателях или конденсаторе турбины он вновь растворяется:

$$NH_3 + H_2O \rightarrow NH_4OH \rightleftarrows NH_4^+ + OH^-,$$

повышая pH конденсата. Если в последнем присутствует CO_2, то она связывается аммиаком:

$$2NH_4OH + CO_2 \rightarrow (NH_4)_2CO_3 + H_2O \qquad (5\text{-}7)$$

и конденсат приобретает щелочную реакцию (pH $\geqslant$ 8). Попадая в котел, карбонат аммония разлагается:

$$(NH_4)_2CO_3 \rightarrow 2\uparrow NH_3 + \uparrow CO_2 + H_2O,$$

и рассмотренные процессы повторяются. В деаэраторе и конденсаторе турбины часть аммиака удаляется из системы, поэтому необходим непрерывный ввод его в питательную воду. Аммиак вводится в виде его водного раствора NH_4OH или раствора какой-либо соли аммония (NH_4Cl, $(NH_4)_2SO_4$). В последнем случае следует иметь в виду, что соли аммония в водном растворе являются потенциально кислыми и могут быть применены только при наличии достаточно высокой щелочности котловой воды.

В котле соли аммония претерпевают термический распад с выделением кислоты:

$$(NH_4)_2SO_4 \rightarrow 2\uparrow NH_3 + H_2SO_4, \qquad (5\text{-}8)$$

которая должна нейтрализоваться щелочью, содержащейся в котловой воде:

$$H_2SO_4 + 2NaOH \rightarrow Na_2SO_4 + H_2O. \qquad (5\text{-}8а)$$

Поэтому ввод в котел аммониевых солей равносилен дозировке соответствующей кислоты, что необходимо всегда иметь в виду.

При осуществлении амминирования питательной воды следует учитывать, что высокие концентрации аммиака

в конденсате вызывают коррозию медных сплавов. Считается допустимым, если содержание аммиака в конденсате не превышает 3—4 *мг/л*.

От аммиачной коррозии страдают прежде всего латунные трубки конденсаторов турбин и охладителей пара эжекторов. Аммиачная коррозия латунных трубок усиливается в присутствии кислорода. В конденсаторах чаще всего поражаются трубки пучков, выделяемых для доохлаждения газов («воздушных карманов»). Радикальной мерой борьбы, как показывает опыт, является замена латунных трубок стальными — из нержавеющей стали.

5-4. Коррозия паровых котлов

а) Межкристаллитная коррозия

Межкристаллитная коррозия возникает в заклепочных швах и вальцовочных соединениях паровых котлов, которые омываются котловой водой. Она характеризуется появлением в металле трещин, вначале весьма тонких (волосных), незаметных для глаза, которые, развиваясь, превращаются в большие видимые трещины. Они проходят между зернами (кристаллами) 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* или (старое наименование) *каустической хрупкостью*. Хрупкие разрушения заклепочных швов или вальцовочных соединений, находящихся в контакте с паром, не наблюдаются.

Опытом установлено, что межкристаллитная коррозия возникает лишь при одновременном наличии следующих трех условий: 1) *высоких растягивающих напряжений* в металле, близких к пределу текучести; 2) *неплотностей* в заклепочных швах или вальцовочных соединениях; 3) 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 котлов межкристаллитной коррозией показывает, что во многих случаях первопричиной служили термические деформации эле-

ментов котла, сопровождавшиеся высокими напряжениями в металле. Они возникают при неравномерном одностороннем нагревании или охлаждении элементов котла, быстром сбросе нагрузки, форсированном охлаждении котла при остановке и других аналогичных условиях. Быстрое и неравномерное охлаждение барабанов котлов 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 остановки котла отдельные элементы его (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.

Отсутствие контроля перемещений подвижных элементов котла и несоблюдение правил растопки и остановки его приводят иногда к серьезным последствиям. Так, например, на одной электростанции из-за пропаривания в нижнем барабане был остановлен котел низкого давления. Вскрытие изоляции показало, что вдоль поперечного заклепочного шва, соединяющего днище с барабаном, образовалась трещина длиной по окружности 900 *мм*. Своевременная остановка котла предотвратила его взрыв. Расследование показало, что заклепочные швы этого котла имеют хрупкие разрушения. Было также установлено, что на станции нарушались правила остановки и растопки котлов, отсутствовал контроль термических перемещений элементов их.

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 при давлении в котле. Местное охлаждение барабана всегда сопряжено с появлением в металле высоких растягивающих напряжений. Поэтому ввод в барабан котла относительно холодных потоков производится посредством *термозащитных рубашек* (рис. 5-4), 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, отска-

кивание головок заклепок или дребезжащий звук при обстукивании их молотком во время остановки котла на ремонт, пропаривание и течь заклепочных швов и вальцовочных соединений. При обнаружении этих явлений или одного из них барабаны котла необходимо тщательно проверить в отношении наличия межкристаллитных трещин.

Они могут быть обнаружены при помощи ультразвуковых дефектоскопов или магнитоскопией. В последнем способе, являющемся более надежным, на исследуемом участке заклепочного шва наносится тонкий слой суспензии, содержащей магнитную окись железа (Fe_3O_4), и создается магнитное поле. Частички Fe_3O_4 концентрируются вдоль трещин, обнаруживая тем самым их расположение.

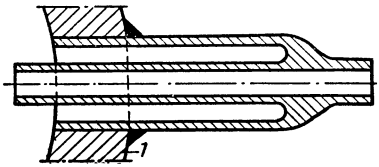


Рис. 5-4. Термозащитная рубашка.
1 — тело барабана.

Агрессивность котловой воды определяется составом растворенных в ней солей. В частности, важное значение имеет содержание едкого натра, который при высоких концентрациях реагирует с металлом. Кроме того, важным показателем агрессивности котловой воды является величина относительной щелочности ее $Щ_{от}$, определяемая выражением:

$$Щ_{от} = \frac{40 Щ^{*}_{кв}}{S_{кв}} 100\ [\%]. \qquad (5\text{-}9)$$

Считается, что значение $Щ_{от}$ не должно превышать 20% для предотвращения хрупких разрушений.

В шести котельных низкого давления, в которых были отмечены случаи повреждения котлов межкристаллитной коррозией, относительная щелочность котловой воды колебалась в пределах 25—52%.

Величина $Щ_{от}$ зависит от состава исходной воды и метода ее обработки, если в котлы добавляются химически обработанная вода. Однако численное значение $Щ_{от}$ не может однозначно характеризовать агрессивность котловой воды. Поэтому на практике она определяется экспериментально при помощи индикатора агрессивности (рис. 5-5).

Испытуемый образец металла *1* зажимается в приборе

* Величина щелочности котловой воды $Щ_{кв}$ определяется без учета фосфатной щелочности.

и изгибается, отчего на стороне, обращенной к прибору, возникают высокие растягивающие напряжения. Котловая вода, циркулирующая по трубе *2*, проникает через отверстие *3* в щель *4*, величина которой регулируется болтом *5*. За счет испарения в щели создаются высокие концентрации NaOH и других солей. Образец испытывают в течение 30 дней. Если после проверки в лаборатории трещин не окажется, новый образец устанавливают на 60 и затем следующий на 90 дней. Отсутствие трещин в образце и в этом последнем случае показывает, что котловая вода не агрессивна. Индикатор обычно устанавливают на линии непрерывной продувки.

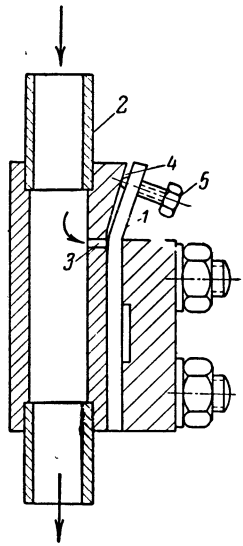


Рис. 5-5. Индикатор агрессивности.

Методы борьбы с хрупкими разрушениями основаны на устранении одного из перечисленных выше трех условий их возникновения. Они заключаются прежде всего в устранении неравномерного обогрева или охлаждения барабанов, наблюдении за расширением трубных контуров котла, выполнении правил остановки и пуска котлов, применении термозащитных рубашек и т. п. Эти мероприятия направлены на ликвидацию чрезмерных напряжений в металле и образования неплотностей.

Борьба с агрессивностью котловой воды ведется двумя способами. По одному из них, известному под названием нитратного режима котловой воды, в котлы вводится раствор калиевой (KNO_3) или натриевой ($NaNO_3$) селитры. Концентрация ее (*мг/л*) в котловой воде должна удовлетворять следующему условию:

$$\frac{[NaNO_3]}{40Ш_{кв}} \geqslant 0{,}35 - 0{,}40. \qquad (5\text{-}10)$$

Соли азотной кислоты (нитраты) пассивируют металл, на чем и основан их защитный эффект. Нитратный режим, являющийся, как показывает опыт, весьма эффективным, применим, однако, только для котлов с давлением пара не выше 70 *ат*. При больших давлениях селитра разлагается и режим теряет свое назначение.

Для котлов высокого давления (> 70 *ат*) применяют второй способ, основанный на удалении из котловой воды агрессивного свободного едкого натра. Он получил название *режима чисто фосфатной щелочности или нуль-каустического режима.* Сущность его заключается в том, что в котловой воде создается щелочность, обусловленная только тринатрийфосфатом.

Если растворить в воде Na_3PO_4, происходит реакция гидролиза, в результате которой возникает NaOH:

$$Na_3PO_4 + H_2O \rightleftarrows Na_2HPO_4 + NaOH. \qquad (5\text{-}11)$$

Эта реакция обратима, и при упаривании воды равновесие сдвигается влево, т. е. в сторону образования Na_3PO_4. При полном выпаривании воды в сухом остатке будет присутствовать только тринатрийфосфат. Следовательно, при упаривании котловой воды с чисто фосфатной щелочностью в неплотностях, возникших в барабане, концентрация NaOH не может достигнуть опасных пределов, что делает эту воду неагрессивной.

Назовем концентрацию едкого натра в котловой воде в *мг/л* *щелочным числом* $Щ_ц$, а концентрацию PO_4^{3-} — фосфатным числом $Ф_ц$. Тогда при наличии в котловой воде только Na_3PO_4 щелочное число будет наибольшим и равным:

$$Щ_ц = \frac{[NaOH]}{(PO_4^{3-})} Ф_ц = 0{,}42Ф_ц. \qquad (5\text{-}12)$$

Если $Щ_ц > 0{,}42Ф_ц$ — режим не будет чисто фосфатным, так как в воде будет присутствовать свободный NaOH; при $Щ_ц = 0{,}42Ф_ц$ режим — чисто фосфатный, но поддерживается с большим трудом. Практически приемлемым является режим, удовлетворяющий условию

$$9 \leqslant Щ_ц \leqslant 0{,}42Ф_ц \text{ при } Ф_ц \geqslant 22 \text{ мг/л}. \qquad (5\text{-}13)$$

В пароконденсатном тракте станции и в котловой воде непрерывно идут процессы, в результате которых образуется свободный едкий натр. К таким процессам можно отнести:

Гидролиз силиката натрия, в результате которого SiO_2 может выпадать из раствора в коллоидной форме:

$$Na_2SiO_3 + H_2O \leftrightarrows 2NaOH + SiO_2. \qquad (5\text{-}14)$$

Попадание в турбинный конденсат из-за присосов бикарбоната кальция и магния и их реакции с фосфатами в котловой воде:

$$\left.\begin{aligned} &10Ca(HCO_3)_2 \rightarrow 10CaCO_3 + 10\uparrow CO_2 + 10H_2O; \\ &10CaCO_3 + 6Na_3PO_4 + 2NaOH \rightarrow Ca_{10}(PO_4)_6 \cdot (OH)_2 + \\ &\qquad + 10Na_2CO_3; \\ &10Na_2CO_3 + 10H_2O \rightarrow 20NaOH + 10\uparrow CO_2. \end{aligned}\right\} \qquad (5\text{-}15)$$

Поступление в питательную воду с химически обработанной водой карбоната или бикарбоната натрия и распад их в котле:

$$\left.\begin{aligned} 2NaHCO_3 &\rightarrow \uparrow CO_2 + Na_2CO_3 + H_2O; \\ Na_2CO_3 + H_2O &\rightarrow 2NaOH + \uparrow CO_2. \end{aligned}\right\} \quad (5\text{-}16)$$

Поэтому при осуществлении режима чисто фосфатной щелочности необходимо в большей или меньшей мере вести нейтрализацию едкой щелочи. Она может быть произведена путем дозировки в питательную воду следующих веществ (каждого в отдельности или в необходимом сочетании), расположенных в порядке возрастания их кислотных свойств: динатрийфосфата Na_2HPO_4, мононатрийфосфата NaH_2PO_4, гексаметафосфата $(NaPO_3)_6$.

б) Стояночная коррозия

Котлы, находящиеся в простое, поражаются электрохимической коррозией, которая получила название стояночной.

По условиям эксплуатации котлы часто выводятся из работы и ставятся в резерв или в длительную остановку. Различают резерв горячий и холодный. В горячем резерве котел находится под давлением. В холодном резерве он стоит с неработающей топкой, но в состоянии готовности к пуску. В длительном простое котел может находиться в любом состоянии, удобном для его сохранности.

При остановке котла в холодный резерв давление в нем начинает падать и при достаточно плотной арматуре в барабане может возникнуть вакуум, вызывающий проникновение в котел воздуха и обогащения котловой воды кислородом. Последнее создает условиях для появления кислородной коррозии. Даже в том случае, когда вода полностью удаляется из котла, внутренняя поверхность его не бывает абсолютно сухой. Колебание температуры и влажности воздуха вызывает явление конденсации влаги из атмосферы, заключенной внутри котла. Наличие же на поверхности металла пленки влаги, обогащенной при доступе воздуха кислородом, создает благоприятные условия для развития электрохимической коррозии.

Если на внутренней поверхности котла имеются отложения, способные растворяться в пленке влаги, интенсивность коррозии значительно возрастает. Подобные условия могут иметь место, например, в пароперегревателях, которые часто страдают от стояночной коррозии. Поэтому при выводе котла из работы в длительный простой необходимо удалить имеющиеся отложения промывкой.

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

В период простоя котла без мер предохранения может протекать обычный процесс коррозии с кислородной деполяризацией, в результате которого образуются окислы трехвалентного железа Fe_2O_3. При работе котла в отсутствие кислорода процесс коррозии может протекать за счет перехода богатого кислородом Fe_2O_3 в более бедный им Fe_3O_4:

$$4Fe_2O_3 + Fe \rightarrow 3Fe_3O_4. \qquad (5\text{-}17)$$

Окислителем (деполяризатором) здесь является твердое вещество — окись железа Fe_2O_3. В следующий период простоя котла магнитная закись-окись железа Fe_3O_4 вновь переходит в Fe_2O_3 за счет контакта с кислородом воздуха:

$$4Fe_3O_4 + O_2 \rightarrow 6Fe_2O_3 \qquad (5\text{-}18)$$

и, следовательно, при повторном пуске котла процесс коррозии будет продолжен с большей интенсивностью. Таким образом, наличие в котле отложений, состоящих главным образом из Fe_2O_3, является опасным не только с точки зрения накипеобразования, но и коррозии, так как это соединение выступает в роли поставщика кислорода (твердого деполяризатора).

Предохранение котлов и другого оборудования от стояночной коррозии достигается определенными условиями его консервации. Она может быть произведена по одному из следующих способов: *сухому, мокрому и газовому.*

Сухой способ заключается в следующем. Котел, пароперегреватель и экономайзер полностью освобождают от воды и отложений и хорошо просушивают. Затем в барабан котла на противнях ставят влагопоглощающие вещества (безводный хлористый кальций, негашеная известь, силикагель) и герметично его закрывают. Происходит полная осушка воздуха внутри котла, вследствие чего электрохимическая коррозия возникнуть не может. Влагопоглотитель постепенно истощает свою влагоемкость и должен периодически заменяться. Сухая консервация наиболее целесообразна при выводе котлов из работы на длительный промежуток времени, а также в том случае, когда нельзя оставлять оборудование с водой (например, зимой на открытом воздухе).

Мокрый способ имеет несколько вариантов. Наиболее удобный из них заключается в том, что котел полностью заполняют питательной водой и в нем поддерживают избы-

точное давление воды, которое создается небольшим открытием вентиля, установленного на питательной линии. Чтобы избежать необходимости держать котел под полным давлением питательных насосов, делают небольшой проток воды, отбирая ее из котла, например через парозаборные устройства для отбора проб или специальные отводы, и направляя в дренажный бак. Преимущество этого способа заключается в его простоте, что позволяет применить его для консервации котлов, выведенных из работы на короткий промежуток времени. Избыточное давление воды в котле препятствует проникновению в него кислорода воздуха.

Газовый способ заключается в том, что котел освобождают от воды и заполняют сверху газообразным аммиаком, вытесняя воздух через нижние точки котла. После заполнения котел герметизируют и давление аммиака в нем поднимают до 100 *мм рт. ст.* В аммиачной атмосфере снижается парциальное давление кислорода. Кроме того, возникающая пленка влаги приобретает высокое pH вследствие растворения в ней аммиака. Оба эти обстоятельства способствуют устранению коррозии. Газовый способ сложен в осуществлении и мало применяется на практике.

в) Пароводяная коррозия

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

$$3Fe + 4H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 4H_2.$$

Она становится возможной при температуре металла 450° С и выше. Продуктами коррозии являются газообразный водород и черная магнитная закись-окись железа. Пароводяная коррозия имеет равномерный характер: на поверхности металла образуется более или менее толстый слой продуктов коррозии, отколотые кусочки которых притягиваются магнитом.

Пароводяная коррозия наблюдается в пароперегревателях и иногда в экранных и кипятильных трубах котлов. Обычно при нормальной циркуляции и отсутствии отложений температура стенки теплонапряженных труб не превышает 350—400° С. Поэтому в нормальном случае пароводяная коррозия в этих трубах возникнуть не может. Однако при нарушении или опрокидывании циркуляции происходит расслоение пароводяной смеси с образованием паро-

вых мешков, создающих условия для значительного увеличения температуры стенки трубы.

Нередко пароводяной коррозией повреждаются отдельные трубки пароперегревателей. Основная причина этого заключается в плохом охлаждении этих трубок паром вследствие неравномерности его распределения по змеевикам. Борьба с пароводяной коррозией производится путем устранения причин, вызывающих нарушение циркуляции или неудовлетворительное охлаждение паром змеевиков пароперегревателей.

Глава шестая

ДЕГАЗАЦИЯ И ОБЕСКИСЛОРОЖИВАНИЕ ВОДЫ

6-1. Термическая дегазация (деаэрация) воды

а) Общие сведения

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

Термическая дегазация воды основана на уменьшении по закону Генри растворимости в воде газов с повышением температуры (см. § 1-2). Численное значение давления, под которым находится деаэрируемая вода, не влияет на эффект деаэрации. Ввиду этого она может быть осуществлена при давлении как выше, так и ниже атмосферного, т. е. в вакууме.

Дегазация воды осуществляется в аппаратах, называемых *деаэраторами* (дегазаторами). По давлению в аппарате деаэраторы разделяются на *вакуумные* ($p<1$ *ата*), *атмосферные* ($p=1{,}05 \div 1{,}5$ *ата*) и *повышенного давления* ($p=1{,}5 \div 6$ *ата*). Атмосферные деаэраторы в свою очередь могут быть подразделены на деаэраторы смешивающего типа и деаэраторы перегретой воды.

б) Деаэраторы смешивающего типа

Атмосферный деаэратор смешивающего типа представлен на рис. 6-1. Он состоит из деаэрационной колонки *1* и бака (аккумулятора) *2*, служащего емкостью для деаэри-

рованной воды. Последний оборудован 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.

В верхней части колонки установлено распределительное устройство *6,* под которым располагаются тарелки *7, 8.*

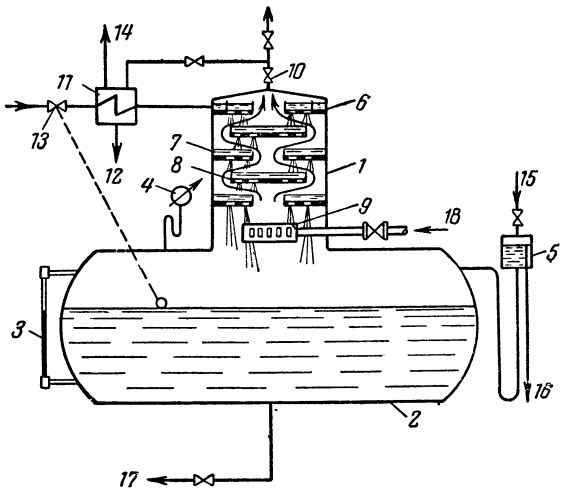


Рис. 6-1. Схема атмосферного деаэратора смешивающего типа.

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, как указано стрелками. Выделяющиеся из воды газы вместе с несконденсировавшимся паром удаляются из колонки через вентиль *10* в атмосферу или поступают в охладитель выпара *11,* в котором пары воды конденсируются, отдавая тепло поступающей в деаэратор воде, и далее направляются в дренажный бак *12.* Вода, нагретая до кипения и освобожденная от газов, падает в аккумулятор, откуда она забирается питательными

насосами. Деаэратор обычно снабжается автоматическими регуляторами подачи пара и воды *12* и *13*.

Вследствие ряда причин в аккумулятор могут попадать отдельные струи воды, неполностью дегазированные. Поэтому для удаления проскочившего в аккумулятор кислорода часто применяют продувание (барботаж) воды в аккумуляторе паром, получившее название *барботажной додеаэрации*. Для этого в аккумуляторе устанавливаются специальные сопла или в простейшем случае укладываются вдоль него дырчатые трубы, в которые и подается греющий пар, давление которого выше давления пара, поступающего в колонку. Интенсивно перемешивая воду и поддерживая ее в состоянии кипения, барботаж пара способствует достижению более полного удаления растворенных в ней газов.

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 104,3° С при $P=1{,}2$ *ата*. 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 $P_м$, а температура кипения воды в деаэраторе зависит от абсолютного давления, равного сумме показаний манометра и барометра $P_б$.

2. Количество греющего пара, подаваемое 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.

До известной степени деаэрационные установки обладают способностью саморегулироваться, т. е. без вмешательства персонала или автоматики компенсировать возникающие в ходе работы неравномерности тепловой нагрузки. Сущность этого явления заключается в следующем. При уменьшении подачи в колонку пара или при увеличении поступления в нее воды без увеличения потребления пара давление в деаэраторе падает. Последнее вызывает два следствия: вода в баке-аккумуляторе вскипает, из отбора турбины увеличивается по-

ступление в колонку греющего пара. Оба эти процесса действуют в направлении повышения давления в деаэраторе, так как увеличивают поступление в него пара. При повышении давления в деаэраторе поступление в него греющего пара из отбора уменьшается. Одновременно температура воды в баке-аккумуляторе повышается. Эти процессы действуют в сторону понижения давления. Рассмотренные процессы могут компенсировать лишь небольшие нарушения теплового режима деаэратора.

3. Деаэрируемая вода должна подвергаться достаточно тонкому разбрызгиванию 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. На электростанциях Советского Союза наибольшее распространение получили струйные деаэраторы, в которых вода разделяется на мелкие струи при помощи рассмотренных дырчатых тарелок. Применяются также пленочные деэраторы, в которых вода разделяется на тонкие пленки. Один из приемов образования пленок заключается в том, что в колонку загружаются специальные мелкие элементы — кольца, различным образом изогнутые пластинки, цилиндрики,— образующие насадку. Вода, поступающая в насадку, разделяется на тонкие пленки, стекающие по поверхности элементов. Непрерывно стекающие пленки можно также получить при помощи параллельно или концентрически установленных металлических пластин, на которые поступает деаэрируемая вода.

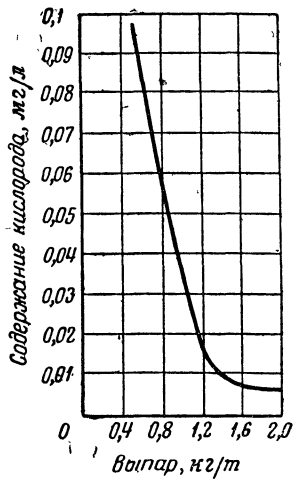


Рис. 6-2. Зависимость содержания кислорода в деаэрированной воде от размера выпара.

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, как это можно видеть из графика рис. 6-2. Для обеспечения устойчивой деаэрации воды расход выпара не должен быть 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*. В целях экономии тепла выпар обычно направляется в устанавливаемые на деаэраторах холодильники выпара. Конденсат выпара направляется в дренажные баки станции.

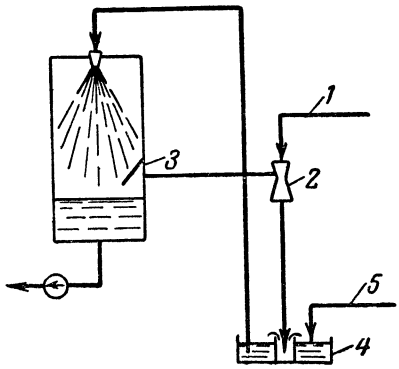


Рис. 6-3. Схема вакуумной деаэрации.

5. При параллельной работе нескольких деаэраторов важно обеспечить во всех них одинаковое давление, чтобы устранить перетекание (выдавливание) 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. Ремонт деаэраторов следует производить не реже раза в год.

в) Вакуумная деаэрация

Для современных электростанций термическая деаэрация при $t > 100°$ С является основным методом удаления из воды коррозионно агрессивных газов. Однако существуют потребители, которые не допускают подогрев воды до 100° С и выше. К таким потребителям относятся, например, котлы низкого давления и малой мощности. В этом случае приемлемым способом может оказаться дегазация воды под вакуумом.

Схема вакуумной деаэрационной установки с подогревом воды до деаэратора представлена на рис. 6-3. Деаэрируемая вода *1* под давлением подается к эжектору *2*, который отсасывает парогазовую смесь из деаэрационной ко-

лонки *3* и тем самым создает в ней заданный вакуум. Вода подогревается в баке *4* подводимой в него горячей водой *5* до температуры, большей температуры насыщения, соответствующей давлению в колонке, и поступает в нее под действием атмосферного давления. Здесь она разбрызгивается и вскипает, что ускоряет процесс дегазации. В зависимости от величины вакуума температура деаэрированной воды может изменяться в широких пределах от 10° С и выше.

Мощными вакуумными деаэраторами на электростанциях являются конденсаторы турбин, вакуум в которых поддерживается на уровне 95—97%. Поэтому они иногда используются для деаэрации всей воды, поступающей в питательную схему котлов. Схема деаэрации воды в конденсаторе представлена на рис. 6-4. Добавляемая вода *1* подается в резервный бак *2* и затем в конденсатор *7*, где и происходит ее дегазация. Отсюда в смеси с конденсатом конденсатным насосом *3* она подается во всас питательного насоса *4*. При установившемся режиме подача конденсатного насоса немного превышает подачу питательного. Избыток воды поступает в дыхательный бак *5*, из него по переливной воронке в резервный бак *2*, из которого через перепускной клапан *6* снова в конденсатор. Если подача питательного насоса превышает подачу конденсатного, недостаток покрывается притоком воды из дыхательного бака.

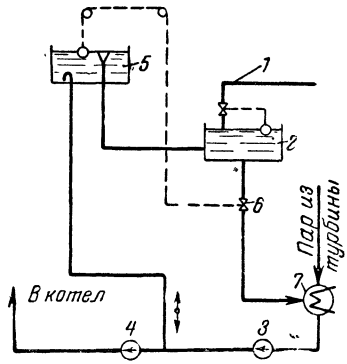


Рис. 6-4. Схема деаэрации воды в конденсаторе.

Дыхательный бак является в этой схеме источником поступления в систему кислорода, так как очень трудно надежно изолировать его от атмосферы. Большую трудность также представляет обеспечение высокой плотности всей схемы в отношении проникания в нее атмосферного кислорода. Эти недостатки явились причиной того, что эта схема деаэрации не нашла распространения на отечественных электростанциях, хотя при правильной эксплуатации она может обеспечить требуемую деаэрацию.

г) Деаэраторы перегретой воды

Схема деаэратора перегретой воды приведена на рис. 6-5. Деаэрируемая вода *5* поступает вначале в охладитель выпара *1*, затем в подогреватель *2*, в котором она подогревается паром *4* до 115—120° С. Перегретая вода, попадая в деаэрационную колонку *3*, в которой поддерживается

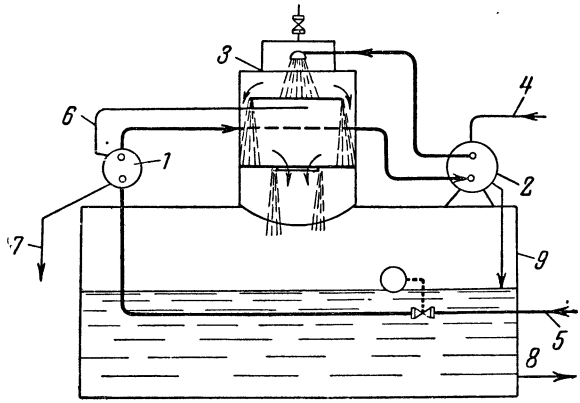


Рис. 6-5. Схема деаэратора перегретой воды.

давление 1,2—1,3 *ата*, вскипает, освобождается от газов и собирается в аккумуляторе *9*, откуда деаэрированная вода *8* поступает к питательным насосам. Выходящая из колонки паровоздушная смесь *6* проходит через охладитель выпара, откуда конденсат выпара *7* направляется в дренажный бак. Деаэраторы перегретой воды применяются на отдельных ранее сооруженных установках. В настоящее время эти деаэраторы промышленностью не выпускаются, так как применение их требует расходования пара более высокого давления, чем требуют атмосферные деаэраторы, что экономически невыгодно. Кроме того, подогрев перед деаэратором воды, содержащей кислород, интенсифицирует коррозию подогревателя *2* и трубопроводов.

6-2. Химическое обескислороживание воды

а) Реагентный способ

Химическое обескислороживание воды реагентным способом основано на связывании растворенного в ней кислорода веществами, способными вступать с ним в интенсив-

ное 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) лежит реакция окисления сульфита растворенным в воде кислородом:

$$2Na_2SO_3 + O_2 \rightarrow 2Na_2SO_4. \qquad (6\text{-}1)$$

При этом важно, чтобы такая реакция была завершена за время прохода воды от места ввода сульфита до защищаемого оборудования, в частности экономайзера котла. Для этого необходимо температуру воды поддерживать не ниже 80° С и избыток сульфита не меньше 2 *мг/л*.

Сульфит натрия подают в воду в виде 3—6%-го раствора при помощи шайбовых дозаторов (см. § 8-2) в количестве, определяемом формулой

$$(Na_2SO_3) = 8\,(O_2) + 2 \text{ мг/л}, \qquad (6\text{-}2)$$

где (O_2) — концентрация растворенного в воде кислорода, *мг/л*.

При определении расхода технического сульфита следует учитывать кристаллизационную воду ($Na_2SO_3 \cdot 7H_2O$).

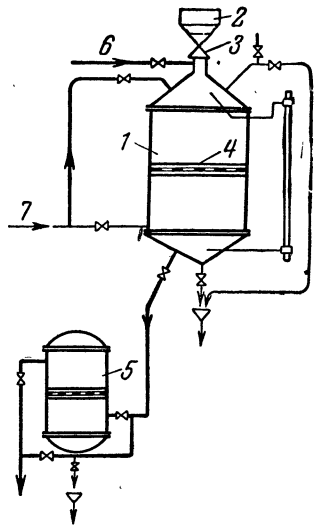


Рис. 6-6. Схема установки для приготовления раствора сульфита.

Раствор сульфита интенсивно 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 рис. 6-6 приведена 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 шайбовые дозаторы.

Сульфитирование обладает рядом достоинств: оно просто в осуществлении и обслуживании, доступно для многих мелких потребителей, не требует громоздкой и дорогой аппаратуры Крупным 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 содержание кислорода достигает 8—10 *мг/л,* то общее повышение сухого остатка может составить 100—120 *мг/л*. Поэтому на современных электростанциях сульфитирование питательной воды применяется для связывания остатков (проскоков) кислорода после термических деаэраторов, т. е. для дообескислороживания воды. В этих условиях ($t>100°$ С) реакция (6-1) идет с высокой скоростью при минимальных избытках сульфита, концентрация которого обычно не превышает 1,5—2 *мг/л*.

При высоком давлении ($p>60$ *ата*) в условиях котловой воды сульфит натрия разлагается с образованием летучих сероводорода и сернистого ангидрида, которые уносятся паром и понижают pH конденсата. Поэтому для котлов высокого давления он неприменим.

В случае повышенной щелочности питательной воды вместо сульфита может быть применен сернистый ангидрид SO_2, вдувание которого в воду вызывает следующие реакции:

$$SO_2 + H_2O \rightarrow H_2SO_3;$$

$$H_2SO_3 + 2NaOH \rightarrow Na_2SO_3 + 2H_2O, \qquad (6\text{-}3)$$

приводящие к образованию сульфита. Применение SO_2 требует специальных устройств для хранения его в жидком виде и для растворения в воде.

Кроме сульфита, в отдельных случаях находят применение также бисульфит $NaHSO_3$ и гидросульфит натрия $Na_2S_2O_4$, которые являются более дорогими реагентами.

За последние годы промышленное применение получил гидразин N_2H_4, являющийся лучшим обескислороживающим реагентом. Реакция гидразина с кислородом протекает по уравнению

$$O_2 + N_2H_4 \rightarrow \overset{\uparrow}{N_2} + 2H_2O. \qquad (6\text{-}4)$$

Скорость этой реакции значительно выше, чем реакция окисления сульфита. Гидразин не увеличивает сухого остатка питательной воды и не дает вредных летучих продук-

тов распада, что позволяет применить его для прямоточных котлов. Следует, однако, иметь в виду, что гидразин и его растворы ядовиты и при работе с ними необходимо иметь требуемые средства защиты (очки, респиратор, перчатки).

Гидразин поступает в продажу обычно в виде сульфата $N_2H_4 \cdot H_2SO_4$. Водные растворы гидразина концентрацией 40% и выше могут воспламеняться.

В условиях котловой воды, кроме реакции окисления, которая является основной, происходит и вторая:

$$2N_2H_4 \rightarrow 4\overset{\uparrow}{NH_3} + \overset{\uparrow}{N_2}, \qquad (6\text{-}5)$$

в результате которой образуется аммиак, уходящий с паром и повышающий pH конденсата. Она становится возможной при большем избытке гидразина, чем это требуется для связывания кислорода. В этом случае возможно также взаимодействие гидразина, являющегося активным восстановителем, с окислами железа:

$$6Fe_2O_3 + N_2H_4 \rightarrow \overset{\uparrow}{N_2} + 4Fe_3O_4 + 2H_2O. \qquad (6\text{-}6)$$

б) Сталестружечный способ

В этом способе химического обескислороживания вода пропускается (фильтруется) через слой стальных стружек, компактно загруженных в фильтры. При контакте с чистой поверхностью стальных стружек протекают процессы электрохимической коррозии железа, на что и расходуется растворенный в воде кислород:

$$\left.\begin{array}{c} 2Fe - 4e \rightarrow 2Fe^{2+} \\ O_2 + 4e + 2H_2O \rightarrow 4OH^- \\ 2Fe^{2+} + 4OH^- \rightleftarrows 2Fe(OH)_2 \\ 2Fe(OH)_2 + H_2O + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow 2Fe(OH)_3 \\ \hline 2Fe + 1\frac{1}{2}O_2 + 3H_2O \rightarrow 2Fe(OH)_3 \end{array}\right\} \qquad (6\text{-}7)$$

Если в отношении теплосилового оборудования стараются создать наименее благоприятные условия для протекания этих процессов, то в сталестружечном фильтре, наоборот, принимаются все меры к тому, чтобы максимально их ускорить. Этому способствуют сравнительно высокая температура воды (>70—75° С) и отсутствие на поверхности стружек каких-либо отложений (ржавчины, на-

кипи, масла и др.). Поэтому перед употреблением стружка простой углеродистой стали промывается, с целью обезжиривания, горячим раствором (2—3%) едкого натра или тринатрийфосфата и затем горячей водой. Для снятия ржавчины она может быть обработана раствором (2—3%) соляной кислоты. Последняя операция способствует также активированию поверхности стружек. По причине загрязнения поверхности стружек, обескислороживание жесткой (исходной) воды или загрязненной взвешенными веществами происходит неудовлетворительно. Поэтому этот способ успешно может быть использован для обескислороживания только умягченной и осветленной воды.

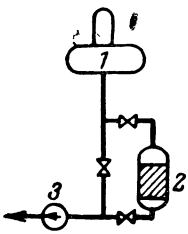


Рис. 6-7. Схема включения сталестружечного фильтра после деаэратора.

1 — деаэратор; *2* — сталестружечный фильтр; *3* — питательный насос.

Сталестружечный способ употребляется в качестве основного в мелких промышленных котельных низкого давления для обескислороживания воды, добавляемой в теплосеть, и производственного конденсата. Во всех этих случаях на сталестружечные фильтры поступает вода с содержанием кислорода в пределах 3—5 *мг/л*. В условиях высокой концентрации кислорода в фильтруемой воде стальные стружки быстро покрываются слоем ржавчины и эффект обескислороживания снижается. После фильтров содержание кислорода в воде в этих случаях составляет порядка 0,1—0,2 *мг/л*.

Значительно лучшие результаты достигаются при применении сталестружечных фильтров для улавливания проскоков кислорода после термических деаэраторов (рис. 6-7). Высокая температура воды ускоряет процессы коррозии стружек и способствует глубокому обескислороживанию воды. Следует, однако, учитывать, что при недостаточном подпоре гидравлическое сопротивление сталестружечного фильтра в схеме рис. 6-17 может сделать работу питательных насосов ненадежной.

Время контакта $t_к$ [*мин*] обескислороживаемой воды со стружкой зависит от температуры. Характер этой зависимости представлен на рис. 6-8. Скорость фильтрования воды v [*м/ч*], высота слоя стружек в фильтре $h_{ст}$ [*м*] и время контакта связаны зависимостью

$$v_ф \frac{t_к}{60} = h_{ст}, \qquad (6\text{-}8)$$

которой и пользуются при расчёте и конструировании сталестружечных фильтров. В качестве таковых обычно применяются фильтры, аналогичные механическим (§ 8-1).

При расчете сталестружечных фильтров определяемыми величинами являются: объем $V_{стр}$ или вес $G_{стр}$ стружек, загруженных в фильтр, высота слоя стружек $h_{ст}$ и площадь фильтра $f_{ф}$ [$м^2$]. При определении расхода стружек можно принимать, что на связывание 1 $кг$ кислорода требуется 2,4 $кг$ железа (исходя из реакции



Рис. 6-8. Зависимость времени пребывания воды в сталестружечном фильтре от температуры.

$4Fe + 3O_2 = 2Fe_2O_3$). Допустимый износ стружки принимается примерно в размере 50%. Следовательно, на 1 $кг$ удаляемого кислорода следует загружать в фильтр 5 $кг$ железных стружек. Насыпной вес стружек в фильтре при достаточном их уплотнении можно принимать равным 1 $т/м^3$. Тогда объем загружаемых в фильтр стружек будет определяться формулами:

$$V_{стр} = \frac{Q_{ср}(O_2)\, t_o \cdot 5}{10^3 \cdot 10^3}\ [м^3]; \qquad (6\text{-}9)$$

$$V_{стр} = \frac{Q_м\, t_к}{60}\ [м^3], \qquad (6\text{-}10)$$

где $Q_{ср}$, $Q_м$ — средний и максимальный расходы фильтруемой воды, $м^3/ч$;

t_o — число часов работы фильтра за период между сменами стружек.

Из двух значений $V_{стр}$ выбирается наибольшее. Скорость фильтрования можно принимать 15—20 $м/ч$. Стружки легированных сталей применять нельзя.

6-3. Десорбционное обескислороживание воды

Для уяснения сущности принципа, на котором основано десорбционное обескислороживание, рассмотрим следующий эксперимент. Возьмем сосуд, заполненный водой, содержащей растворенный кислород, и начнем продувать его газом, не содержащим кислорода, например азотом. Тогда растворенный в воде кислород (а также CO_2 и другие газы,

кроме азота) начнет выделяться в газовую атмосферу и удаляться из сосуда. Спустя некоторое время вода в сосуде окажется обескислороженной. Процесс выделения кислорода (десорбция) будет проходить более интенсивно, если газ продувать (барботировать) сквозь воду. Интенсивность десорбции будет тем выше, чем больше поверхность воды (при прочих равных условиях), контактирующей с газом, т. е. чем лучше вода перемешивается с ним.

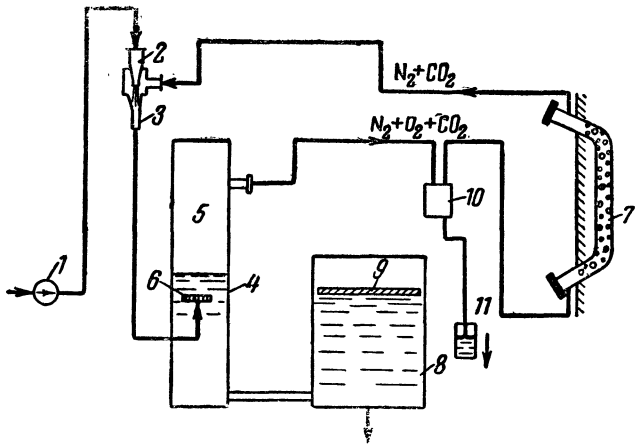


Рис. 6-9. Схема установки для десорбционного обескислороживания воды.

Выделение кислорода из воды в этом эксперименте объясняется тем, что растворимость его сильно уменьшилась вследствие падения парциального давления кислорода над поверхностью воды почти до нуля.

Практическое использование этого явления, основанного на законе Генри (§ 1-2), осуществлено в методе десорбционного обескислороживания воды, разработанном докт. техн. наук Акользиным П. А. и инж. Глушенко В. В. и состоящем в следующем. Подлежащая обескислороживанию вода (рис. 6-9) насосом *1* под давлением 3—4 *ати* подается к эжектору *2*. Здесь она захватывает лишенный кислорода газ из реактора *7*, перемешивается с ним и в виде газоводяной смеси выбрасывается в диффузор *3* и далее в десорбер *4*, где происходит разделение воды и газа, который выделяется в газовый объем *5* десорбера, чему способствует отбойный щиток *6*. Отсюда газ, содержащий кислород, поступает в реактор *7*, представляющий

собой стальную трубу, концы которой закрываются глухими фланцами. Он заполняется древесным углем и помещается в газоход котла, в котором температура газов составляет порядка 500—600° С. Вместо газохода котла реактор может быть помещен в специальную топку или в другое место, где температура его может поддерживаться на указанном уровне.

При соприкосновении поступившего в реактор газа с накаленным углем происходит связывание кислорода по реакциям:

$$C + O_2 \rightarrow CO_2;$$
$$2C + O_2 \rightarrow 2CO.$$

Лишенный кислорода газ засасывается эжектором, и описанный цикл повторяется вновь. Так как в эжекторе с водой смешивается газ, не содержащий кислорода, в нем, а также в диффузоре и сепараторе происходит интенсивный процесс десорбции кислорода из воды.

Обескислороженная вода из десорбера поступает в бак *8*, в котором для уменьшения площади контакта воды с воздухом помещен деревянный щит *9*, закрывающий почти всю поверхность воды. По пути к реактору газ проходит водоотделитель *10*, в котором отделяется большая часть унесенной газом из десорбера капельной влаги, которая затем удаляется через гидрозатвор *11*.

Как показывает опыт, рассматриваемый способ позволяет снижать остаточное содержание в воде кислорода до 0,04—0,05 *мг/л* при $t = 40°$ С, что вполне приемлемо для котлов низкого давления. Десорбционный способ удовлетворительно решает задачу обескислороживания воды при сравнительно низких температурах, что имеет важное значение для многих промышленных установок. Он нашел широкое применение в промышленных котельных.

Глава седьмая

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ВОДЫ И ПАРА

7-1. Общие требования к химическому контролю

Водный режим современных электростанций высокого и сверхвысокого давлений характеризуется весьма малыми концентрациями отдельных веществ в пароводяном цикле. Так, например, содержание железа в питательной воде ба-

рабанных котлов не должно превышать 0,05 *мг/л*, допустимое солесодержание пара и содержание кислорода в питательной воде измеряются сотыми долями миллиграмма, концентрация в питательной воде и конденсате Ca^{2+} и Mg^{2+} ограничивается 0,05—0,1 *мг/л* и т. д. Поэтому химический контроль водного режима современных электростанций отличается высокой точностью применяемых методов определений.

Степень точности данных химического контроля зависит от некоторых условий. Если истинная концентрация в пробе определяемого вещества равна C', а найденная C'', то относительная ошибка δ будет равна:

$$\delta = \frac{C' - C''}{C'} 100 = \frac{\Delta C}{C'} 100\ [\%]. \qquad (7\text{-}1)$$

Как видим, при данной точности метода определения ΔC относительная ошибка δ будет тем меньше, чем больше концентрация вещества C'. Если последняя лишь немного превышает ΔC, определение делается неточным. В этом случае прибегают к двум мерам: либо изыскивают новый способ определения, обладающий большей точностью, либо различными способами повышают концентрацию определяемого вещества в пробе. Последний метод повышения точности определений наиболее широко используется на практике. Искусственное повышение концентрации веществ в пробе носит название о б о г а щ е н и е п р о б ы.

Требование своевременности результатов химического контроля означает, что с момента возникновения необходимости в знании данной величины и до момента ее измерения должно пройти минимум времени. В наибольшей мере этому требованию отвечает контроль, основанный на применении автоматических приборов, широко используемых на современных электростанциях.

7-2. Отбор проб воды и пара

Отбор проб из гомогенной (однородной) среды, какой являются питательная и химически обработанная вода и конденсат, не представляет затруднений, так как многие способы отбора дают вполне представительные пробы [1]. Питательная, химически обработанная вода и конденсат для общего анализа большей частью отбирают через пробоот-

[1] Отражающие качество того потока, из которого они отобраны.

борную трубку, приваренную к водопроводу. Если вода имеет высокую температуру ($t>40°$ С), проба ее должна быть направлена для охлаждения в холодильник. Многие пробы воды и конденсата отбирают периодически, например через 2 или 3 *ч*. В этом случае качество потока в промежуток времени между отбором проб остается неизвестным. Если необходимо устранить этот недостаток, организуется непрерывный отбор средней пробы за смену, за сутки и т. д.

Трудной задачей является отбор представительных проб из неоднородной (гетерогенной) среды, какой является насыщенный пар котлов, так как капельки котловой воды распределены в потоке пара неравномерно. Ввиду этого при отборе пробы в нее может попасть главным образом пар (улучшенная проба) или, наоборот, преимущественно капельки котловой воды (ухудшенная проба).

При малой скорости потока пара в середине трубы движется в основном сухой пар, а уносимая им влага образует на стенках паропровода пленку, движущуюся вместе с ним. Такое состояние расслоения сохраняется до момента достижения потоком пара некоторой скорости, называемой критической, при которой пленка влаги начинает срываться, дробиться и уноситься потоком в виде мелких капель. Величина критической скорости пара зависит от давления. При давлении пара от 40 до 140 *ат* критическая скорость пара по срыву пленки находится в пределах 2—4 *м/сек*. Для полного срыва пленки необходимо, чтобы скорость движения пара по паропроводу в 5—6 раз превышала критическую.

Основным пароотборным устройством является щелевая трубка (щелевой зонд), представленная на рис. 7-1. Пробоотборная трубка *1* имеет ряд отверстий, расположенных по образующей. Вдоль отверстий и рядом с ними припаиваются две пластинки *2*, образующие щель. В паропровод трубка вставляется щелью навстречу потоку пара.

Если скорость движения пара в паропроводе $v_п > 6v_{кр}$, отбор пробы осуществляется щелевой трубкой без каких-либо дополнительных устройств, так как в этом случае влага будет равномерно распределена в потоке пара. При $v_п < 5v_{кр}$ необходимо специальное устройство для срыва пленки, в качестве которого применяют смесительное устройство ЦКТИ, представленное на рис. 7-2. В паропроводе устанавливается усеченный конус *1*, по длине которого укреплено несколько конических колец *2*. Меньшим

основанием конус *1* присоединен к трубе *3*, в которой устанавливается щелевой зонд *4*. Пленка влаги, увлекаемая паром, набегает на конические кольца и срывается с их кромок потоком. В трубе *3* скорость пара выше критиче-

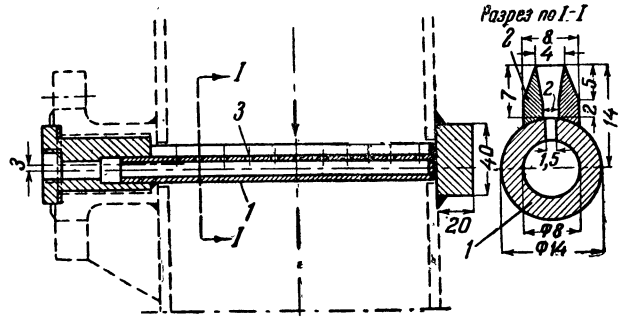


Рис. 7-1. Щелевая пароотборная трубка.

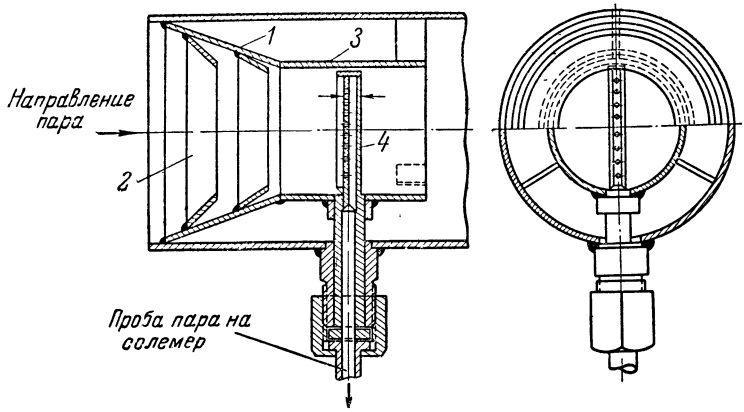


Рис. 7-2. Устройство для отбора средней пробы пара со смесителем ЦКТИ.

ской и влага находится в распыленном состоянии. Такой отбор проб пара имеет преимущество, особенно при повышенных нагрузках котла, когда влажность пара повышается.

В том случае, когда диаметр труб, отводящих пар из барабана, небольшой и установка в них смесителя или щелевого зонда сложна, применяют *устьевые* трубки, предложенные ОРГРЭС. На рис. 7-3 представлены различные варианты пароотборных устройств. В них проба пара

отбирается из потока его на входе в пароотводящую трубу (устьевая трубка). Состав пробы будет соответствовать в этом случае качеству основного потока, если скорости входа пара в обе трубы будут примерно равны. Поэтому конец пробоотборной трубки, развернутый небольшим конусом, устанавливается в плоскости расположения начала

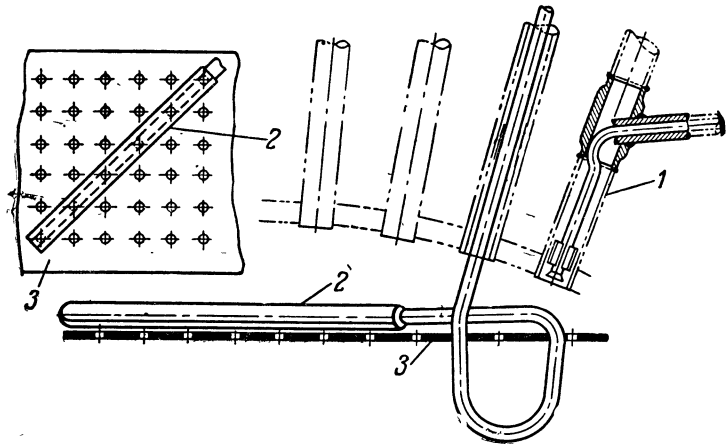


Рис. 7-3. Отбор проб насыщенного пара различными зондами.
1 — устьевая трубка; *2* — щелевая трубка; *3* — дырчатый потолочный лист.

пароотводящей трубы. Второй вариант дает пример отбора пробы непосредственно в барабане котла при помощи щелевой трубки.

Отобранная проба пара направляется в холодильник для ее конденсации или к солемеру Мостофина (§ 7-3). На современных электростанциях высокого и сверхвысокого давлений пробоотборные трубки и проводка должны выполняться из коррозионноустойчивых (нержавеющих) сталей, чтобы исключить загрязнение пробы пара соединениями железа. Перегретый пар может отбираться простой щелевой трубкой, поскольку он представляет собой однородную среду.

7-3. Контроль качества пара методом электропроводности

Способность вещества проводить электрический ток можно характеризовать или электропроводностью его, или сопротивлением. Удельным сопротивлением ρ называется сопротивление столбика вещества высотой 1 *см* и попереч-

ным сечением 1 $см^2$. При работе с водными растворами электролита часто пользуются величиной, обратной удельному сопротивлению ρ, которая называется удельной электропроводностью:

$$\varkappa = \frac{1}{\rho}\ [ом^{-1} \cdot см^{-1}]. \qquad (7\text{-}2)$$

Электропроводность водных растворов электролитов обусловлена наличием в них различных ионов, которые и переносят электрические заряды. Поэтому вода, лишенная

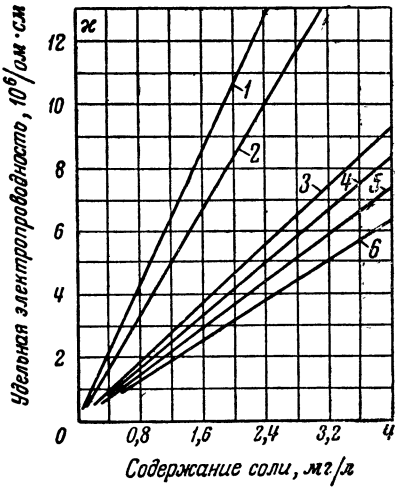


Рис. 7-4. Изменение удельной электропроводности электролитов в области малых концентраций.

1 — NaOH; *2* — KOH; *3* — $MgCl_2$; *4* — $CaCl_2$; *5* — $CaSO_4$, $MgSO_4$, NaCl, KCl; *6* — Na_2SO_4.

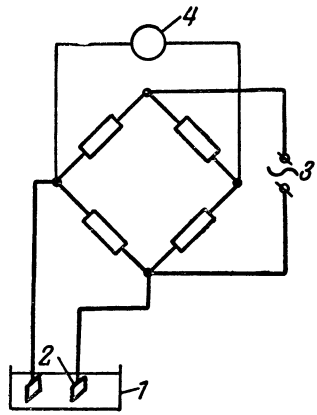


Рис. 7-5. Принципиальная измерительная схема.

электролитов, обладает ничтожной электропроводностью, которая, однако, будет увеличиваться с ростом концентрации S растворенных в ней солей. Это увеличение в области разбавленных растворов будет происходить пропорционально S, что означает, что величина $\varkappa$ будет зависеть в основном от концентрации растворенных солей $\varkappa = \varphi(S)$ (рис. 7-4).

Практическое использование этой зависимости для определения концентрации растворенных в воде солей можно осуществить, например, при помощи установки, принципиальная схема которой показана на рис. 7-5. Сосуд *1*, содержащий исследуемую воду и погруженные в нее

электроды *2*, называется датчиком. Он подключается к одному из плеч неравновесного моста, к которому подведено питание от источника переменного тока *3*. Гальванометр *4* служит для измерения величины тока. Если теперь в датчик последовательно заливать пробы воды с возрастающей концентрацией соли и отмечать каждый раз показание гальванометра, то зависимость $\varkappa = \varphi(S)$ может быть представлена в виде тарировочного графика. Он позволяет найти солесодержание исследуемой пробы воды или конденсата по величине ее электропроводности, т. е. по показанию гальванометра. Приборы, аналогичные рассмотренному, т. е. основанные на измерении электропроводности водных растворов и служащие для определения концентрации растворенных веществ (солесодержания), называются *солемерами.*

На величину электропроводности водных растворов существеннее влияние оказывает концентрация присутствующих в них газов — аммиака и углекислоты, которые при растворении их в воде образуют ионы:

$$\left.\begin{aligned} NH_3 + H_2O \rightleftarrows NH_4OH \rightleftarrows NH_4^+ + OH^-; \\ CO_2 + H_2O \rightleftarrows H_2CO_3 \rightleftarrows H^+ + HCO_3^-, \end{aligned}\right\} \qquad (7\text{-}3)$$

повышающие электропроводность пробы. Поэтому наличие этих газов в контролируемой пробе воды будет завышать показания солемеров. Так, например, содержание 1 *мг/л* NH_3 равноценно по электропроводности содержанию в растворе примерно 3,6 *мг/л* NaCl.

Если электропроводность пробы, соответствующая наличию нелетучих электролитов (истинное солесодержание) равна S_n, а соответствующая газам — $S_г$ (газовая составляющая), то показание солемера S_0 будет равно

$$S_0 = S_n + S_г.$$

Условие точного измерения величины S_n требует, чтобы $S_n \gg S_г$ (полное удаление из воды газов в условиях эксплуатации оказывается невозможным). Ввиду этого в солемерах, применяемых на практике, проба пара перед поступлением в датчик подвергается дегазации, что значительно повышает точность измерения.

В настоящее время на электростанциях широкое распространение получил стационарный солемер системы инж. А. А. Мостофина (рис. 7-6). Насыщенный пар через

штуцер *6* поступает в полую неизолированную трубу *1*, называемую *дегазационным холодильником* с воздушным охлаждением. В нем, а также и в самой пароотборной линии, которая на длине 8—10 *м* не покрывается изоляцией, часть пара конденсируется. Большая часть несконденсировавшегося пара вместе с газами через ниппель *7* выбрасывается в атмосферу (первая ступень дегазации). Образовавшийся в холодильнике конденсат поступает во вторую трубку *2*, называемую *расширителем*, в которой поддерживается атмосферное давление. В расширителе конденсат вскипает (давление в холодильнике больше атмосферного) с выбросом пара и газов в атмосферу через отверстие *7* (вторая ступень дегазации). Дегазированный конденсат с постоянной температурой 100° С поступает в датчик *3*, обогреваемый паром, выходящим через трубку *9*, и снабженный регистратором *5*. Конденсат через бачок *4* сливается в воронку *8* и далее в дренажный бак.

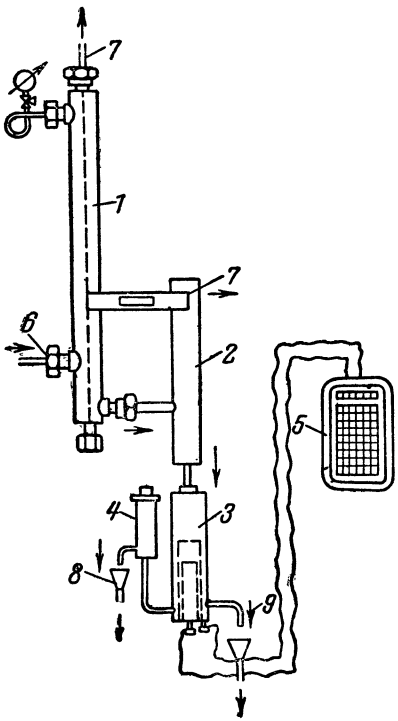


Рис. 7-6. Схема солемера Мостофина с дегазатором.

Вследствие трудности полного удаления из пробы газов солемеры Мостофина дают завышенные показания. Поэтому они выполняют роль *сигнализаторов* моментов ухудшения качества пара, что является весьма важным для эксплуатации.

7-4. Способы обогащения проб пара

Численные значения концентрации примесей в паре $S_п$, наблюдаемые на практике, весьма малы. Это делает задачу точного их определения достаточно сложной, так как чув-

ствительность применяемых способов измерения в ряде случаев оказывается недостаточной. Ввиду этого на практике прибегают к различным способам обогащения пробы.

Один из способов основан на принципе промывки большой массы пара небольшим количеством влаги. Если отбирается проба пара d_n [*кг/ч*] и она промывается q [*кг*] влаги, можем составить следующее уравнение материального баланса:

$$d_n S_n = q S_n', \tag{7-4}$$

откуда

$$\Psi_{пр} = \frac{d_n}{q} = \frac{S_n'}{S_n}. \tag{7-5}$$

Величина Ψ называется степенью обогащения пробы. Отделяя промывочную влагу от пара, можно получить пробу с концентрацией солей в Ψ раз больше, чем в паре. При этом проба обогащается только солевой составляющей S_n; газовая составляющая $S_г$ остается без изменений или уменьшается, так как при обогащении происходит и глубокая дегазация пробы. Практическое использование идеи обогащения пробы становится возможным лишь в том случае, если значение Ψ будет достаточно большим, заранее известным и практически постоянным.

Наиболее просто эти условия выполняются при обогащении пробы насыщенного пара высокого давления (>80 *ата*). Если пар давлением, например, 100 *ата* подвергнуть дросселированию, скажем, до 25 *ата*, то произойдет его увлажнение, так как увеличение теплосодержания пара на $(i_{25} - i_{100}) = 17{,}6$ *ккал/кг* при адиабатическом процессе возможно только за счет частичной конденсации его. Обозначим теплосодержание пара перед дроссельным устройством $i_н$ и после него $i_к$. Тогда количество образующейся влаги при дросселировании насыщенного пара высокого давления $(1 - x)$ будет равно:

$$(1 - x) = \frac{i_к - i_н}{r_к} \text{ [кг на 1 кг пара]}, \tag{7-6}$$

откуда

$$\Psi_{пр} = \frac{r_к}{i_к - i_н}, \tag{7-7}$$

где r — теплота парообразования, соответствующая давлению после дросселя, *ккал/кг*.

Следовательно, значение $\Psi_{пр}$ определяется параметрами пара до и после дросселя и является примерно постоянным и заранее известным. Этот принцип обогащения пробы нашел применение в солемерах МЭИ и БПК.

В солемере МЭИ (рис. 7-7) насыщенный пар, отобранный из паропровода *1*, направляется в дроссельное устройство *2*. В нем пар увлажняется и промывается. В сепараторе *3* происходит отделение влаги, содержащей почти все

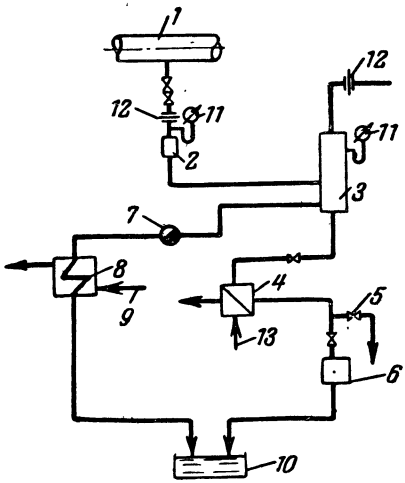


Рис. 7-7. Схема солемера Московского энергетического института (МЭИ).

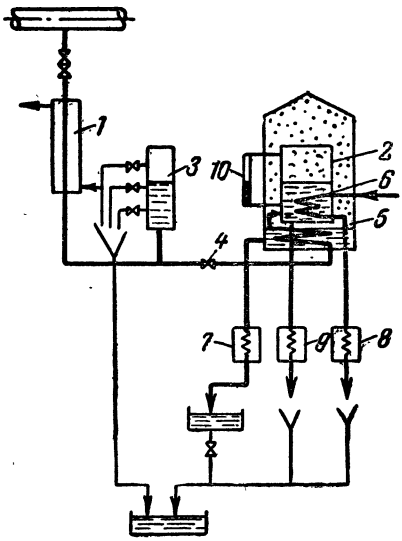


Рис. 7-8. Схема соленакопителя.

примеси, присутствовавшие в паре. Обогащенная проба направляется в холодильник *4* и далее в датчик солемера *6*. Через краник *5* проба может быть отобрана для лабораторного анализа. Избыток конденсата отводится конденсационным горшком *7* через холодильник *8* в бак *10*. Пар из сепаратора вместе с газами удаляется в атмосферу или в паропровод соответствующего давления. Количество отбираемого из паропровода и сбрасываемого из сепаратора пара контролируется расходомерами *12*, давление — манометрами *11*. Солемер БПК имеет аналогичную схему.

Эти солемеры показывают качество пробы в данный момент. Существуют, однако, приборы, измеряющие *среднее* качество пара за некоторый промежуток времени. Эти приборы получили название *соленакопителей*.

На рис. 7-8 представлена схема соленакопителя, предложенного чл.-корр. АН СССР М. А. Стыриковичем. Отобранная проба пара кон-

денсируется в холодильнике *1* и поступает во внутренний сосуд *2* соленакопителя. Уровень жидкости в нем устанавливается и поддерживается краниками в сосуде *3* и контролируется по стеклу *10*. Перед поступлением в испаритель *2* проба подогревается вторичным паром в змеевике *4*. В сосуде *2* проба испаряется греющим паром, проходящим по змеевику *6*, вследствие чего она упаривается и дегазируется. Вторичный пар, образовавшийся при испарении пробы, конденсируется во внешнем сосуде *5* и холодильнике *7*. Холодильник *8* служит для полной конденсации греющего пара. Обогащенная проба поступает на анализ через холодильник *9*.

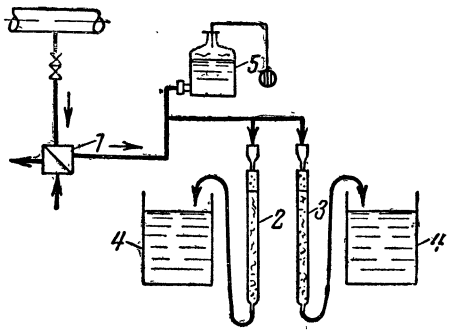


Рис. 7-9. Схема установки для определения солесодержания пара методом химического концентрирования.

Соленакопитель работает в течение заданного промежутка времени t_c [*ч*]. При отборе пробы пара $d_п$ [*кг/ч*] в него поступает всего $d_п t_c$ [*кг*] конденсата. Если после отключения соленакопителя количество оставшейся в испарителе воды будет равно $d_в$ [*кг*], то

$$\Psi_{пр} = \frac{d_п t_c}{d_в} = \frac{d'_п + d_в}{d_в}, \qquad (7\text{-}8)$$

где $d'_п$ — количество, *кг*, вторичного пара за время t_c.

Численное значение $\Psi_{пр}$ может быть доведено до 80—100.

Метод химического концентрирования веществ, при помощи которого определяется также среднее качество пара, разработан канд. техн. наук Кострикиным Ю. М. Сущность его заключается в следующем (рис. 7-9).

Проба пара конденсируется в холодильнике *1* и направляется в фильтры *2* и *3*, представляющие собой стеклянные трубки, заполненные специальным материалом — ионитом. Ионит в фильтре *2* способен поглощать только катионы, в фильтре *3* — только анионы. После фильтров конденсат поступает в мерные баки *4*. Сосуд *5* является буферной емкостью, стабилизирующей напор. Для точного выполнения анализа через каждый фильтр пропускают 200—400 *л* конденсата. Содержащиеся в этом объеме катионы останутся в фильтре *2*, анионы — в фильтре *3*. Их вытесняют путем промывания неболь-

шим объемом (1—2 *л*) раствора кислоты (фильтр *2*) и едкого натра (фильтр *3*). Промывные воды собирают и определяют химическим анализом концентрацию в них катионов и анионов. Метод химического концентрирования широко применяется в практике химического контроля водного режима котлов.

7-5. Теплохимические испытания паровых котлов

Водный режим барабанного котла определяется тремя величинами: нагрузкой D_n, высотой уровня котловой воды в барабане h_y и концентрацией веществ в котловой воде $S_{кв}$. Максимально допустимое численное значение этих величин должно быть известно эксплуатационному персоналу, чтобы обеспечить надежную работу котла и турбины. Они не могут быть найдены расчетом и обычно определяются путем проведения теплохимических испытаний паровых котлов.

Задача этих испытаний заключается в том, чтобы для данного котла установить характер зависимостей $S_n = f(D_n)$, $S_n = \varphi(h_y)$ и $S_n = \psi(S_{кв})$, которые и определяют предельно допустимые значения D_n, h_y и $S_{кв}$. Для этого котел оборудуется необходимыми пробоотборными устройствами котловой воды и пара и контрольно-измерительными приборами.

Вначале при наибольшей нагрузке котла, изменяя высоту уровня котловой воды и измеряя S_n, выясняют характер влияния h_y на S_n. По данным замеров строится график зависимости $S_n = \varphi(h_y)$, определяющий предельную величину h_y. Вторым этапом является установление характера влияния нагрузки на качество пара при допустимом h_y и нижнем пределе допустимого солесодержания котловой воды. Для этого увеличивают постепенно D_n и одновременно определяют S_n, после чего строят график зависимости $S_n = f(D_n)$. Последним этапом является установление зависимости $S_n = \psi(S_{кв})$ при максимально допустимой нагрузке котла и допустимом уровне котловой воды. Для этого непрерывная продувка закрывается или прикрывается и наращивается концентрация солей в котловой воде при одновременном определении S_n.

Установленные теплохимическим испытанием допустимые значения D_n, h_y и $S_{кв}$ являются для данного котла нормами его водного режима. Они не являются неизменными.

Усовершенствование внутрибарабанных сепарационных устройств, улучшение качества питательной воды и другие мероприятия могут внести существенные коррективы в ранее установленные нормы.

7-6. Нормы качества питательной, котловой воды и пара

Нормами качества воды и пара называют предельные величины жесткости, щелочности, солесодержания, кремнесодержания или содержания агрессивных газов, превышение которых может привести к образованию отложений или коррозии. Различают нормы расчетные и эксплуатационные. Расчетные нормы используются при составлении проектов водоподготовительных установок или внутрикотловых устройств. Эксплуатационные нормы, как правило, устанавливаются путем проведения специальных испытаний котла или водоподготовительной установки или на основе обобщения эксплуатационных данных.

Как расчетные, так и эксплуатационные нормы должны удовлетворять требованиям Правил устройства и безопасной эксплуатации паровых котлов Госгортехнадзора, Правил технической эксплуатации электростанций (ПТЭ).

Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых котлов Госгортехнадзора СССР, обязательные для всех промышленных предприятий и ведомств Советского Союза, содержат ряд требований и норм, регламентирующих водный режим котлов. Согласно этим правилам должна быть обеспечена работа котла без повреждений его элементов вследствие отложений накипи, шлама или в результате коррозии. Для каждого котла производительностью 2 *т/ч* и выше должны быть установлены эксплуатационные нормы качества котловой воды и пара, режим продувок и график останова котла на чистку. Организация водного режима котлов должна определяться инструкцией, утвержденной администрацией предприятия. Все вновь вводимые в эксплуатацию котлы производительностью 2 *т/ч* и выше следует оборудовать установками для докотловой обработки или устройствами для внутрикотловой обработки воды.

Общая жесткость питательной воды паровых котлов (кроме прямоточных) производительностью 2 *т/ч* и выше не должна превышать следующих среднемесячных норм:

Водотрубные котлы с давлением пара, *ат*	До 16	От 16 до 31,5	От 31,5 до 100	100 и выше
Жесткость, *мг-экв/л*	0,3	0,02	0,01	0,005

Для котлов с дымогарными трубами жесткость питательной воды не должна превышать 0,5 *мг-экв/л*.

Содержание кислорода в питательной воде котлов производительностью 2 *т/ч* и выше не должно превышать:

Для котлов с давлением пара, *ат*	До 31,5	Более 31,5
Содержание кислорода, *мг/л*	0,03	0,02

Для котлов с давлением пара до 31,5 *ат* без экономайзеров или с чугунными экономайзерами при жесткости питательной воды меньше 0,5 *мг-экв/л* содержание кислорода не должно превышать 0,1 *мг/л*. При наличии устройства для внутрикотловой деаэрации питательной воды содержание в ней кислорода не нормируется.

Для предупреждения межкристаллитной коррозии правилами Госгортехнадзора предусматривается проверка агрессивности котловой воды при вводе в эксплуатацию водоподготовительной установки или при изменении способа водоподготовки, могущего вызвать увеличение относительной щелочности котловой воды.

Министерством электростанций разработаны расчетные нормы качества пара, питательной и котловой воды для проектируемых котельных агрегатов и электростанций, излагаемые ниже. Согласно этим нормам качество пара, поступающего в турбины, должно удовлетворять требованиям, представленным в табл. А. В ней (равно как и в других таблицах) нормативы даны раздельно для электростанций конденсационного типа и теплоэлектроцентралей. Содержание в паре кремниевой кислоты нормируется для давления 60 *ат* и выше (у турбины).

В воде, применяемой для впрыска при регулировании температуры перегретого пара, допускается содержание следующих веществ в количестве не более: соединений натрия в пересчете на сульфат натрия 100 *мкг/кг*, кремниевой кислоты в пересчете на SiO_3^{2-} 50 *мкг/кг*, соединений кальция и магния (жесткость) 5 *мкг-экв/кг*. При этом качество перегретого пара не должно выходить за пределы норм, указанных в табл. А.

Качество питательной воды для электростанций с барабанными котлами должно удовлетворять нормам, представленным в табл. Б. Содержание масла в любой составляющей питательной воды при давлениях, больших 45 *ат*, не должно превышать 5 *мг/кг*. Кремнесодержание питательной воды нормируется для давления пара 70 *ат* и выше. Содержание в питательной воде нитратов плюс нитри-

Таблица А

Расчетные нормы качества пара

Давление пара у турбины, *ат*	Максимально допустимое содержание веществ в паре					
	соединений натрия в пересчете на сульфат натрия, *мкг/кг*		кремниевой кислоты в пересчете на SiO_3^{2-}, *мкг/кг*		свободной углекислоты CO_2, *мг/кг*	
	ГРЭС	ТЭЦ	ГРЭС	ТЭЦ	ГРЭС	ТЭЦ
40 и ниже	200	300	—	—	10	20
Менее 90	200	200	20	30	5	20
90 и более	50	80	20	30	2	7

тов в пересчете на NO_2^- не должно превышать 20 *мкг/кг* для котлов с давлением 110 *ат* и выше и 50 *мкг/кг* для давлений 45—100 *ат*. Для котлов с давлением пара, меньшим 45 *ат*, содержание нитритов не должно превышать 50 *мкг/кг*, содержание нитратов не нормируется.

Качество питательной воды для прямоточных котлов любых давлений без сепараторов и с вынесенной переходной зоной должно удовлетворять следующим требованиям: общая жесткость не выше 1 *мкг-экв/л*, содержание следующих веществ не более: соединений натрия в пересчете на сульфат натрия 50 *мкг/кг*, кремниевой кислоты в пересчете на SiO_3^{2-} 20 *мкг/кг*, кислорода 15 *мкг/кг*, железа (Fe) 30 *мкг/кг*, меди (Cu) 30 *мкг/кг*, значение pH не ниже 7, содержание масла — следы.

Солесодержание и кремнесодержание продувочной воды для барабанных котлов следует принимать в зависимости от давления и типа внутрикотловых устройств согласно данным табл. В. В первом пункте этой таблицы меньшие цифры относятся к котлам с одним барабаном малого диаметра ($<1\,300$ *мм*) и чисто объемной сепарацией; большие — к котлам с барабаном, большим 1 300 *мм*, и к котлам с разделительным барабаном.

Свободная гидратная щелочность (т. е. избыточная сверх находящейся в равновесии с фосфатионами) котловой воды на ТЭЦ при давлениях от 155 до 45 *ат* в пересчете на едкий натр не должна превышать 20% от общего солесодержания. Для давлений ниже 45 *ат* допускается более высокое содержание свободной гидратной щелочности котловой воды при условии добавления соответствующих

Таблица Б

Расчетные нормы качества питательной воды для барабанных котлов

Давление пара в барабане котла, *ат*	Максимально допустимое содержание веществ в питательной воде													
	всех солей[1], *мг/кг*		общая жесткость, *мкг-экв/кг*		кремнекислоты в пересчете на SiO_3^{2-}, *мг/кг*[1]		растворенного кислорода, *мкг/кг*		соединений железа в пересчете на Fe, *мкг/кг*		соединений меди в пересчете на Cu, *мкг/кг*		масла, *мг/кг*	
	ГРЭС	ТЭЦ	ГРЭС	ТЭЦ	ГРЭС	ТЭЦ	ГРЭС	ТЭЦ	ГРЭС	ТЭЦ	ГРЭС	ТЭЦ	ГРЭС	ТЭЦ
45 и ниже	$\frac{10}{20}$	$\frac{100}{500}$	10	10	—	—	30	30	100	100	50	50	3	3
45—100	$\frac{5}{20}$	$\frac{100}{250}$	5	10	0,1	2,0	20	20	50	80	50	50	1	1
110	$\frac{2}{10}$	$\frac{100}{100}$	5	5	$\frac{0,05}{0,1}$	$\frac{0,5}{1,0}$	15	15	30	50	30	30	0,5	0,5
155	$\frac{1}{10}$	$\frac{30}{50}$	5	5	$\frac{0,03}{0,05}$	$\frac{0,1}{0,2}$	15	15	30	50	30	30	0,5	0,5

[1] В числителе даны значения для расчета водоочистительных установок и водного режима электростанций, в знаменателе — для расчета внутрикотловых устройств котлоагрегатов.

Таблица

Тип внутрикотловых устройств	Давление пара в барабанах котла, *ат*						
	45 и ниже	45—100		110		155	
	Максимально допустимое содержание, *мг/кг*						
	всех солей	кремнекислоты в пересчете на SiO_3^{2-}	всех солей	кремнекислоты в пересчете на SiO_3^{2-}	всех солей	кремнекислоты в пересчете на SiO_3^{2-}	всех солей
1. Без ступенчатого испарения и без барботажной промывки всего пара, выдаваемого котлом	500—2 000	2—3	300—1 000	1—2	200—600	0,3—0,5	150—300
2. Без ступенчатого испарения, но с барботажной промывкой всего пара, выдаваемого котлом, питательной водой нормированного качества . . .	—	40	1 500	20	1 000	5	500
3. Со ступенчатым испарением (отсеки внутрибарабанные или выносные, включенные по пару параллельно барабану), но без барботажной промывки всего пара, выдаваемого котлом	4 000—6 000	20	4 000	—	—	—	—
4. Со ступенчатым испарением (отсеки внутрибарабанные или выносные) без промывки всего пара, выдаваемого котлом	—	—	—	10	3 000	4	1 500
5. Со ступенчатым испарением при внутрибарабанных соленых отсеках и с барботажной промывкой всего пара, выдаваемого котлом, питательной водой нормированного качества	—	80	5 000	50	4 000	15	2 500
6. Со ступенчатым испарением и барботажной промывкой всего пара, выдаваемого котлом, питательной водой нормированного качества при предвключенных выносных отсеках II или III ступеней испарения	10 000—15 000	150	10 000	80	6 000	30	5 000

пассиваторов. Для ГРЭС с давлением от 155 до 45 *ат* предусматривается режим чисто фосфатной щелочности котловой воды. Для конденсационных станций с давлением 45 *ат* и ниже по свободной щелочности допускаются режимы, указанные для теплоэлектроцентралей.

Величина непрерывной продувки барабанных котлов не должна превышать следующих норм, установленных ПТЭ (§ 396): для конденсационных электростанций с восполнением потерь дистиллятом — 1%, для конденсационных электростанций и отопительных ТЭЦ с восполнением потерь химически обработанной водой — 2%, для ТЭЦ с безвозвратной отдачей пара на производство — 5%. Пропускная способность устройств непрерывной продувки должна быть не менее 0,3% для ГРЭС и 1% для ТЭЦ.

Глава восьмая

УДАЛЕНИЕ ИЗ ВОДЫ ГРУБОДИСПЕРСНЫХ И КОЛЛОИДНЫХ ПРИМЕСЕЙ

8-1. Осветление воды

а) Основные понятия

Осветлением называют процесс удаления из воды грубодисперсных и коллоидных примесей, являющихся причиной мутности воды. Удаление грубодисперсных загрязнений (собственно осветление) может быть осуществлено *осаждением и фильтрованием.*

При осаждении частички твердых веществ под действием силы тяжести оседают на дно резервуара, в котором осветляемая вода находится в состоянии покоя или медленного движения по горизонтали или снизу вверх. Следовательно, осаждением можно удалить только тонущие в воде частички. Осаждение требует длительного времени, больших объемов резервуаров и не может обеспечить полного удаления грубодисперсных примесей. Поэтому для целей приготовления добавочной воды в условиях электростанций осаждение как самостоятельный способ осветления воды не применяется.

Фильтрованием называют процесс осветления воды путем пропуска ее через пористое вещество, на поверхности и в порах которого она оставляет грубодисперсные примеси. Аппарат, в котором производится фильтрование, назы-

вается *фильтром*, а пористое вещество, содержащееся в нем, — *фильтрующей средой* или *фильтрующим материалом*. Фильтры, служащие для целей осветления воды, называются *осветлительными фильтрами*. Интенсивность работы фильтра характеризуется *скоростью фильтрования воды* $v_ф$ выражаемой в *м/ч*. Скорость фильтрования на осветлительных фильтрах принимают в пределах 5—7 *м/ч*.

Фильтрование воды происходит под воздействием разности давлений (*м вод. ст.*) над $h_н$ и под $h_к$ фильтрующим слоем $\Delta h = h_н - h_к$. При работе фильтра величина $\Delta h = h_н - h_к$ называется *потерей напора* в фильтрующем слое.

Потеря напора в фильтрующем слое зависит от скорости фильтрования, высоты фильтрующего слоя, диаметра зерен фильтрующего материала и степени заноса его загрязнениями, удержанными из воды. 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. Вместе с ней возрастает и потеря напора от некоторого наименьшего Δh_0, соответствующего чистому слою ($\Delta h_0 \approx 0{,}4 - 0{,}6$ *м вод. ст.*) до максимально допустимого $\Delta h_м$ ($\Delta h_м \approx 8 - 10$ для напорных и 2—3 *м вод. ст.* для открытых фильтров).

По достижении *предельного* загрязнения фильтр выводится из работы и ставится на промывку. При промывке удержанные фильтрующим слоем загрязнения вымываются и сбрасываются в канализацию. 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 *ч*.

Величина фильтроцикла зависит от многих факторов, среди которых необходимо отметить концентрацию взвешенных веществ в фильтруемой воде $C_{вв}$ [*мг/л*] и *грязеемкость* фильтра. Грязеемкостью фильтра называется количество задержанных фильтром за фильтроцикл загрязнений, отнесенное к 1 $м^3$ фильтрующего материала и выраженное в килограммах *Гр*. Чем выше *Гр* при данном $C_{вв}$,

тем больше длительность фильтроцикла. Если через фильтр пропущено $Q_ф$ [$м^3$] воды, то

$$Гр = \frac{Q_ф C_{вв}}{10^3 h_{сл} f_ф} [кг/м^3], \qquad (8\text{-}1)$$

где $h_{сл}$, $f_ф$ — высота фильтрующего слоя и площадь сечения фильтра.

В качестве фильтрующих материалов применяют *дробленый антрацит* (1—2 *мм*) и *кварцевый песок* (0,5—1 *мм*)

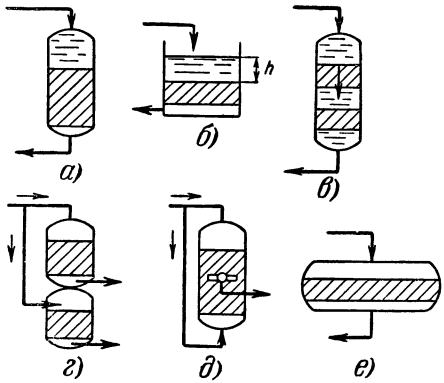


Рис. 8-1. Схемы осветлительных фильтров.

а — однопоточный, однослойный, напорный; *б* — открытый; *в* — двухслойный с последовательным включением слоев; *г* — двухслойный с параллельным включением слоев (двухэтажный); *д* — двухпоточный; *е* — горизонтальный.

с содержанием SiO_2 не менее 96%. Следует иметь в виду, что кварцевый песок растворяется в щелочной воде, обогащая профильтрованную воду (называемую часто *фильтратом*) кремнекислотой. Поэтому в обессоливающих и обескремнивающих установках кварцевый песок применять нельзя.

б) Устройство осветлительных фильтров

Осветлительные фильтры (рис. 8-1) делятся на *открытые (безнапорные)* и *закрытые (напорные)*. Напорные фильтры в свою очередь можно разделить по конструкции на *горизонтальные и вертикальные,* по количеству фильтрующих слоев — на *однослойные и двухслойные,* по способу фильтрования — на *однопоточные и двухпоточные.*

В открытых фильтрах фильтрование происходит под напором столба воды h в самом фильтре. Эти фильтры широко применяют на очистных установках питьевого водоснаб-

жения. На водоподготовительных установках электростанций они имеют ограниченное применение. К достоинству их следует отнести возможность применения железобетонных конструкций, что позволяет сооружать фильтры с большой площадью фильтрования; к недостатку — малый напор, под которым происходит фильтрование, ограничивающий возможность интенсификации их работы.

Закрытые двухслойные фильтры с последовательным расположением слоев обладают по сравнению с однослойными однопоточными некоторыми преимуществами: они имеют бóльшую грязеемкость, лучше осветляют воду. Однако они требуют бóльшую высоту помещения, более металлоемки, несколько сложнее в эксплуатации. В настоящее время такие фильтры промышленностью не выпускаются.

Двухслойные фильтры с параллельным включением слоев *(двухэтажные)* применяют при недостатке производственной площади для размещения оборудования. Они представляют собой два обычных однослойных фильтра, поставленных друг на друга. Горизонтальные фильтры имеют бóльшую площадь фильтрования и отличаются высокой производительностью. Поэтому они применяются на установках большой производительности (500 $м^3/ч$ и выше).

Двухпоточный фильтр отличается тем, что фильтруемая вода подается в него с двух сторон — сверху и снизу, а осветленная вода отводится водоотборным устройством, расположенным в толще фильтрующего материала. Следовательно, по площади фильтрования двухпоточный фильтр равен двум однопоточным.

Однослойный вертикальный закрытый фильтр является наиболее распространенным типом осветлительного фильтра на водоподготовительных установках. Его устройство показано на рис. 8-2. Корпус фильтра, представляющий собой цилиндр, закрытый сферическими днищами, рассчитан на рабочее давление 6 *ати*. На нижнее днище укладывается слой бетона *4* (бетонная подушка) для создания плоскости, на которой располагается распределительное устройство для воды, называемое *дренажным устройством 5*. Над ним установлено аналогичное распределительное устройство для воздуха *6*. Фильтрующий материал *7* загружается непосредственно на дренажное устройство и опирается на бетонную подушку. В верхней части фильтра укреплены воронка *8* для распределения фильтруемой воды и воздуш-

ная трубка *9* для отвода воздуха. Предусмотренные в корпусе фильтра люки *10* предназначены для осмотра и ремонта фильтра, а люк *11* для выгрузки материала. Через задвижку *1* подводится к фильтру обрабатываемая вода, через задвижку *3* — промывная вода, через задвижку *2* отводится от фильтра осветленная вода.

Наиболее ответственной частью внутреннего оборудования фильтра является дренажное устройство, предназна-

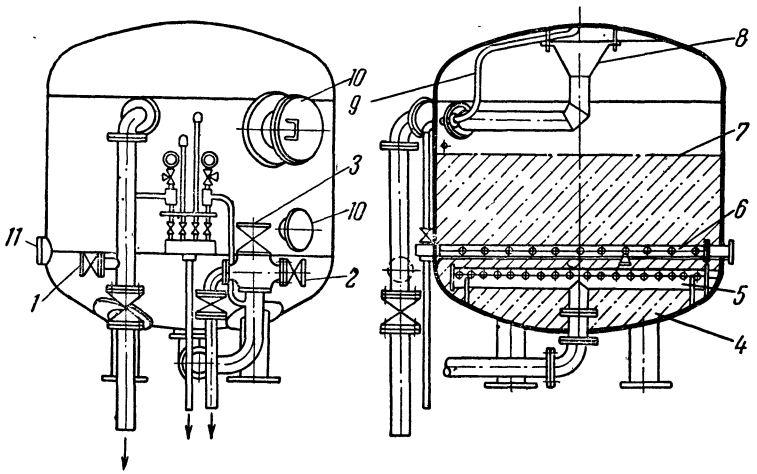


Рис. 8-2. Осветлительный фильтр.

чаемое для равномерного распределения потока воды по площади фильтра, а также для предотвращения выноса фильтрующего материала из фильтра.

Дренажное устройство (рис. 8-3) состоит из коллектора *1*, к которому присоединены патрубки *2*. К последним приварены штуцера *3* (против отверстий), на которых укрепляются на резьбе щелевые колпачки *4*. Узкие щели (0,4—0,5 *мм*) колпачков (рис. 8-4) препятствуют выносу фильтрующего материала, но образуют достаточное живое сечение для прохода воды.

Конструкции колпачков отличаются большим разнообразием. Все они, однако, преследуют одну и ту же основную задачу: воспрепятствовать выносу мелких фракций материала при одновременном минимальном сопротивлении проходу воды. Щели могут быть сделаны на самих патрубках, которые в этом случае должны изготовляться из некорродирующего материала (нержавеющая сталь, винипласт и др.). Получится, таким образом, бесколпачковый щелевой дренаж.

Существуют дренажные устройства, построенные на других прин-

ципах. Широкое применение в прошлом имело дренажное устройство с подстилочными слоями (подстилочный дренаж). В нем в патрубках *2* (рис. 8-3) сверлилось два ряда отверстий 3—5 *мм*, располагавшихся в шахматном порядке. Непосредственно на дренажное устройство загружалась крупная фракция материала с размером зерен 10—20 *мм*, затем шел слой материала с зернами 5—10 *мм*, далее — 2,5—5 *мм* и 1—2,5 *мм*. И только на этот последний слой

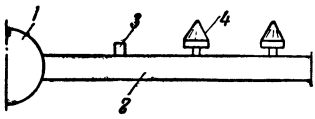


Рис. 8-3. Дренажное устройство фильтра.

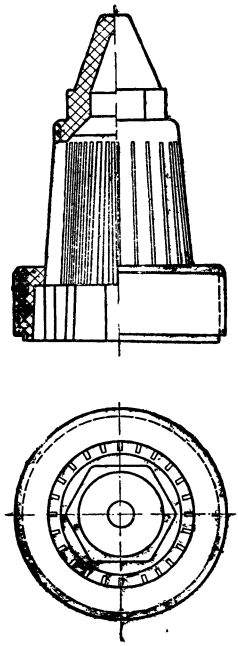


Рис. 8-4. Щелевой колпачок ВТИ-К (верхняя часть).

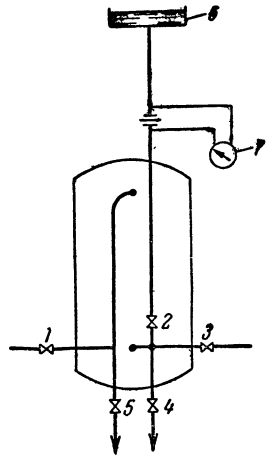


Рис. 8-5. Схема фронта осветлительного фильтра.

загружался фильтрующий материал с размером зерен 0,5—1 *мм*. Все четыре слоя крупных фракций материала выполняли одну задачу — поддерживали фильтрующий слой, препятствуя выносу его из фильтра. Дренаж с подстилочными слоями обладает многими недостатками и постепенно выходит из употребления. Однако на многих установках он еще находит применение.

в) Эксплуатация осветлительных фильтров

Работа фильтра состоит из двух периодов: фильтрования воды (рабочего) и промывки фильтра (простоя). Экс-

плуатация фильтра в первый период состоит в наблюдении за степенью осветления воды, характеризуемой прозрачностью, нагрузкой фильтра и величиной потери напора (сопротивлением фильтра). Для этого фильтр оснащается расходомером осветленной воды и двумя манометрами, подключенными к линиям осветляемой и осветленной воды. Фильтр выводится из работы и ставится на промывку, если потеря напора достигла заданного предела или в случае ухудшения осветления воды (снижение величины прозрачности). Совпадение этих двух показателей необходимости вывода фильтра на промывку наблюдается редко. Остановка фильтра осуществляется закрытием задвижек *1* и *3* (рис. 8-5).

Промывка фильтра осуществляется пропуском через него воды *обратным током,* т. е. снизу вверх. Для этого открывают задвижку *2*, соединяющую фильтр с заполненным водой промывочным баком *6*, устанавливаемым на отметке 12—15 *м*. Затем плавно открывают задвижку *5* на столько оборотов, чтобы скорость воды в фильтре была достаточной для вымывания загрязнений. Эта скорость характеризуется *интенсивностью промывки* $i_{пр}$, показывающей количество литров воды, проходящей в 1 *сек* через 1 $м^2$ площади фильтра ($л/м^2 \cdot сек$). Величина $i_{пр}$ зависит от рода материала, крупности его частиц и температуры промывной воды. Для кварцевого песка $i_{пр} = 12—15$ $л/м^2 \cdot сек$ и дробленого антрацита 7—8 $л/м^2 \cdot сек$. Практически величина $i_{пр}$ контролируется по расходу промывочной воды, измеряемому расходомером *7*. Если интенсивность промывки слишком велика, возможен вынос фильтрующего материала водой в канализацию; при малой ее величине фильтр будет промыт неудовлетворительно.

При промывке обратным током фильтрующий материал расширяется, занимая большой объем; возникает движение зерен материала в восходящем потоке воды, что способствует лучшему вымыванию загрязнений. Для повышения эффективности промывки в фильтр часто подают сжатый воздух через специальное распределительное устройство в течение 3—5 *мин* с интенсивностью порядка 10—15 $л/м^2 \cdot ч$ (для антрацита) и 15—20 $л/м^2 \cdot ч$ (для кварцевого песка).

После пропуска воды через фильтр, на что затрачивается в нормальном случае 6—10 *мин,* задвижки *5* и *2* закрывают и открывают задвижки *1* и *4*. Несколько минут фильтр работает на канализацию с целью удаления первых

мутных порций воды (спуск первого фильтрата). Эта операции является не обязательной, если промывная вода достаточно прозрачна. Как только фильтрат станет прозрачным, задвижку *4* закрывают и фильтр включают в сеть открытием задвижки *3*. В период работы фильтров промывной бак *6* постепенно заполняется водой. На некоторых установках промывная вода подается в фильтр не из бака, а специальным промывочным насосом. Такой вариант применяется в случае, когда отсутствует возможность установить промывочный бак на указанной высоте или такая установка экономически не оправдана.

Промывка двухпоточного фильтра имеет некоторую особенность. Она состоит в том, что вначале промывают верхний слой через средний дренаж, а затем весь слой, как и в однослойном фильтре. Двухпоточные фильтры отличаются значительно большей грязеемкостью и производительностью по сравнению с однопоточными.

Двухпоточный фильтр был предложен канд. техн. наук Минцем Д. М. Идеи, лежащие в его основе, заключаются в следующем:

В обычном однослойном фильтре вследствие многократных промывок происходит гидравлическая сортировка фильтрующего материала таким образом, что внизу располагаются самые крупные, а вверху — самые мелкие зерна. Чем мельче зерна, тем меньше межзерновые поры (объемы) и, следовательно, тем ниже грязеемкость, поскольку загрязнения откладываются в этих порах.

Таким образом, в обычном фильтре верхние слои материала, обладающие минимальной грязеемкостью, воспринимают наибольшее количество загрязнений. Происходит быстрое их забивание и фильтр выводится на промывку раньше, чем грязеемкость, нижележащих слоев будет использована полностью. Этот недостаток устраняется, если осветляемая вода вначале проходит слои с более крупной фракцией зерен, а потом — с убывающей крупностью их. В этом случае наибольшая грязевая нагрузка приходится на слой материала с высокой грязеемкостью. В двухпоточном фильтре такие условия созданы для потока, идущего снизу вверх, что позволяет использовать грязеемкость почти всего фильтрующего слоя.

Увеличения грязеемкости обычных фильтров можно достигнуть, если их загрузить разнородным материалом, например кварцевым песком с зернами 0,5—1 *мм* (нижний слой) и дробленым антрацитом крупностью 1,5—2 *мм*. Тогда при промывке более легкие и крупные зерна антрацита будут всегда располагаться над мелким слоем более тяжелого песка. В двухслойных фильтрах с последовательным расположением слоев с целью увеличения грязеемкости в верхнем слое используется более крупный материал, чем в нижнем.

Производительность одного фильтра определяется по формуле

$$q_{мф} = v_{ф} f_{ф} \ [м^3/ч]. \qquad (8\text{-}2)$$

Производительность фильтровальной установки, состоящей из $Z_ф$ фильтров, может быть выражена количеством поданной на фильтры осветляемой воды (брутто, $Q_{бр}$) или полезно используемой осветленной воды, полученной от установки (нетто, $Q_{нт}$). Разность $Q_{бр} - Q_{нт} = \Delta Q$ характеризует расход воды на собственные нужды установки. На действующих установах величины $Q_{бр}$ и $Q_{нт}$ определяются по показаниям расходомеров. При проектировании они могут быть определены по формулам:

$$Q_{нт} = Z_ф v_ф f_ф \left(\frac{24 - n_{мф}\tau_{мф}}{24}\right), \qquad (8\text{-}3)$$

где $n_{мф}$ — количество промывок каждого фильтра в сутки;

$\tau_{мф}$ — время простоя фильтра в промывке, *ч*.

Расход воды на одну промывку фильтра будет равен:

$$q_{пф} = \frac{3{,}6 i_{пр} f_ф t_{мф}}{60} [м^3], \qquad (8\text{-}4)$$

откуда

$$\Delta Q = \frac{q_{пф} Z_ф n_{мф}}{24} [м^3/ч] \qquad (8\text{-}5)$$

и

$$Q_{бр} = Q_{нт} + \Delta Q, \qquad (8\text{-}6)$$

где $t_{мф}$ — длительность промывки (6—10 *мин*).

8-2. Коагуляция воды

а) Сущность процесса

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 водоприготовления 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 кол-

лоидные частицы данного вещества несут одноименный электрический заряд, препятствующий их соединению.

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

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

В практике водоприготовления в качестве коагуляторов применяются: сернокислое закисное железо $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, сернокислый алюминий $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$, хлорное железо $FeCl_3$, которые вводятся в воду в виде растворов концентрацией 5—10%.

При введении в воду, например, сернокислого алюминия вначале происходит его гидролиз:

$$Al_2(SO_4)_3 + 6H_2O \rightleftarrows 2Al(OH)_3 + 3H_2SO_4 (6H^+ + 3SO_4^{2-}). \quad (8\text{-}7)$$

Образующаяся кислота нейтрализуется щелочностью воды

$$3H_2SO_4 + 3Ca(HCO_3)_2 \rightarrow 3CaSO_4 + 6\uparrow CO_2 + 6H_2O. \quad (8\text{-}8)$$

Если вместо $Al_2(SO_4)_3$ в воду вводится сернокислое железо, эти процессы также будут иметь место:

$$\left.\begin{aligned} &FeSO_4 + 2H_2O \rightleftarrows Fe(OH)_2 + H_2SO_4 (2H^+ + SO_4^{2-});\\ &H_2SO_4 + Ca(HCO_3)_2 \rightarrow CaSO_4 + 2\uparrow CO_2 + 2H_2O. \end{aligned}\right\} \quad (8\text{-}9)$$

Коагулирующим действием обладает не $Fe(OH)_2$, а гидрат окиси железа $Fe(OH)_3$. Следовательно, при применении в качестве коагулятора двухвалентного железа необходимо обеспечить окисление его в трехвалентное растворенным в воде кислородом:

$$2Fe(OH)_2 + \frac{1}{2} O_2 + H_2O \rightarrow 2Fe(OH)_3, \quad (8\text{-}10)$$

которое в щелочной среде протекает сравнительно легко.

Приведенные реакции показывают, что при коагуляции щелочность воды понижается, а содержание в ней свободной CO_2 возрастает. Ввиду этого коагулируемая вода должна обладать некоторым минимумом щелочности, определяемым выражением:

$$Ш_{мн} = d_{кг} + 0{,}4 \ мг\text{-}экв/л, \qquad (8\text{-}11)$$

где $d_{кг}$ — доза коагулятора, *мг-экв/л*.

Если фактическая щелочность обрабатываемой воды $Ш_о < Ш_{мн}$, необходимо вводить в нее щелочь (NaOH, Na_2CO_3) в количестве

$$\Delta Ш_к = d_{кг} + 0{,}4 - Ш_о. \qquad (8\text{-}12)$$

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

При проведении коагуляции стремятся к тому, чтобы введенное в воду количество коагуляторов было в последующем максимально выделено из воды в виде осадка и удалено в отстойниках или на осветлительных фильтрах. В противном случае создается опасность наноса в котлы железа или алюминия. Ввиду этого является важным создать такие условия, при которых введенный в воду коагулятор 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 pH, величина дозы коагулятора, температура воды и др. Влияние pH особенно существенно при коагуляции воды сернокислым алюминием. Как следует из реакции гидролиза

$$2Al^{3+} + 6H_2O \rightleftarrows 2Al(OH)_3\downarrow + 6H^+, \qquad (8\text{-}13)$$

увеличение концентрации водородных ионов, т. е. понижение pH воды, сдвигает равновесие этого процесса влево. При достаточно низком pH $Al(OH)_3$ переходит в раствор и процесс коагуляции нарушается. Гидрат окиси алюминия растворяется и при достаточно высоком pH ($\geqslant 8$) с образованием алюминатов:

$$Al(OH)_3 + NaOH = NaAlO_2 + 2H_2O. \qquad (8\text{-}14)$$

Поэтому этот коагулятор не следует применять, если обрабатываемая вода имеет pH ≥ 8, как, например, на установках с известкованием. В этих случаях он заменяется соединениями двух- или трехвалентного железа, коагуляции которыми успешно проводится и при pH>8. Величина pH и дозы коагулятора для данной воды устанавливаются опытным путем в лаборатории. Ориентировочно можно считать, что pH при употреблении соединений алюминия лежит в пределах 5—7 и железа — 8—10. Величина дозы сернокислого алюминия лежит в пределах 0,2—1 *мг-экв/л*, а закисного железа — 0,1—0,5 *мг-экв/л*. Оптимальная температура коагулируемой воды составляет 30—40° С.

б) Приготовление и дозирование раствора реагентов.

Расход коагулятора, считая на безводное (100%-ное) вещество, определяется по формуле

$$g_{кг} = \frac{Q_{бр} d_{кг} Э_к}{1\,000} [кг/ч]. \qquad (8\text{-}15)$$

Технического продукта, содержащего $C_{кг}[\%]$, действующего начала, т. е. чистого вещества, будет расходоваться в $(100 : C_{кг})$ раз больше. Соответствующий количеству $g_{кг}$ объем рабочего раствора концентрацией $C_{вп}[\%]$ будет равен:

$$V_р = \frac{g_{кг} \cdot 100}{\gamma_р^{кг} C_{вп}} [л/ч]. \qquad (8\text{-}16)$$

Количество щелочи $g_щ$, расходуемой на подщелачивание коагулируемой воды, находится по формуле

$$g_щ = \frac{Q_{бр} \Delta ЩЭ_к}{1\,000} [кг/ч]. \qquad (8\text{-}17)$$

Приготовление рабочих растворов коагулятора или щелочи производится чаще всего в специальных баках, называемых *гидравлическими мешалками* (рис. 8-6). Отмеренное (взвешенное) количество реагента $G_{кг}$ загружается в гидромешалку *1*, предварительно на $^3/_4$ заполненную водой *13*. Для перемешивания раствора открываются задвижки *3*, *4* и *5* и пускается насос *2*, забирающий раствор снизу и возвращающий его снова в мешалку. Для подогрева рас-

твора в целях ускорения его растворения может подаваться пар *12*. После достаточного (15—30 *мин*) перемешивания насос останавливают, задвижки *3* и *5* закрываются и раствору дают отстояться. Осветленный раствор перекачивается насосом в распределительный бак *9*, из которого по трубопроводу *11* происходит заполнение дозаторов. Открытыми при этом являются задвижки *7*, *4* и *8*.

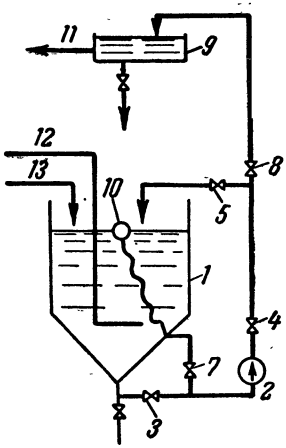


Рис. 8-6. Схема гидравлической мешалки для приготовления растворов легкорастворимых реагентов.

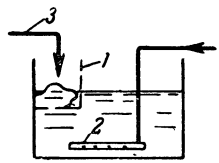


Рис. 8-7. Бак для растворения реагентов.

Если используемый (рабочий) объем мешалки равен $V_м$ [$м^3$] и необходимо приготовить раствор концентрацией $C_{вп}$[%], то в мешалку загружается следующее количество безводного реагента:

$$G_{кг} = \frac{V_м \cdot 10^3 \gamma_р^{кг} C_{вп}}{100} [кг]. \qquad (8\text{-}18)$$

Приготовленный объем раствора обеспечит непрерывную работу установки в течение $t_{кг}$ *ч*, где

$$t_{кг}' = \frac{V_м \cdot 10^3 \gamma_р^{кг} C_{вп}}{100 g_{кг}^{ч}} [ч]. \qquad (8\text{-}19)$$

Чтобы исключить захватывание осевшего на дно мешалки шлама, всасывающий патрубок насоса подвешивается к поплавку *10*. Такая предосторожность оказывается излишней, если реагент не содержит загрязнений.

На небольших установках раствор приготовляется в обычных баках (рис. 8-7). Сухой реагент загружается в сетчатую корзину *1*, через которую бак заполняется водой *3*. Перемешивание раствора производится воздухом или паром через барботер *2*. Нерастворимые примеси (шлам) удаляются в канализацию.

Растворы коагуляторов являются кислыми и интенсивно разрушают металл. Поэтому приготовление и хранение их часто производят в деревянных баках. Металлическая аппаратура (баки, дозаторы, насосы) и трубопроводы должны иметь противокислотную изоляцию или выполняться из кислотостойких сортов стали.

Раствор коагулятора или щелочи подается в воду при помощи устройств или аппаратов, которые называются *дозаторами.* Основное требование, предъявляемое к дозатору, состоит в том, что он должен точно поддерживать заданную дозу реагента во всем диапазоне изменения нагрузки водоподготовительной установки. При этом имеется в виду, что качество обрабатываемой воды остается без изменений. Если же оно меняется, то оказывается необходимым вмешательство персонала, так как дозаторы «не чувствуют» качественного изменения обрабатываемой воды. Следовательно, регулировка подачи реагентов «по качеству» выполняется персоналом, а «по количеству»— самим дозатором. Поскольку качество исходной воды изменяется постепенно и притом лишь в отдельные периоды года, это вполне удовлетворяет эксплуатацию.

Конструкции дозаторов разнообразны. На водоподготовительных установках электростанций СССР применяются главным образом дозаторы растворов реагентов. Они могут быть разделены на дозаторы *безнапорные* и *напорные.* К безнапорным относятся *дозаторы-вытеснители* (поплавковые) и *сифонные* дозаторы. В группу напорных дозаторов входят *шайбовые* и *насосы-дозаторы.*

Дозатор-вытеснитель поплавкового типа состоит из внешнего бака *1* и внутреннего *2*, выполняющего роль поплавка (рис. 8-8). Раствор реагента через вентиль *3* подается в бак *1*, который заполняется им до уровня сливного краника *4*. После этого в поплавок *2* пускается струя воды интенсивностью $V_в$ [*л/ч*], что утяжеляет его и обусловливает вытеснение эквивалентного объема реагента $V_р$, равного:

$$V_р = \frac{V_в \gamma_в}{\gamma_р} \text{ [л/ч]}. \qquad (8\text{-}20)$$

Безнапорные дозаторы работают всегда в сочетании с аппаратом, называемым водораспределителем, который нормирует струю воды, поступающую в дозаторы, в частности в поплавок *2*. После срабатывания всего раствора реагента, что происходит в момент, когда заполненный водой

поплавок касается дна бака *1*, дозатор ставится на перезарядку. Последняя состоит в том, что сифоном вода удаляется из поплавка в дренаж и бак *1* снова заполняют раствором реагента. Установка состоит из двух дозаторов, работающих поочередно. Дозаторы-вытеснители поплавкового типа отличаются простым устройством, надежностью в работе и точным отмериванием раствора. Однако они требуют высотной компоновки водоподготовительной уста-

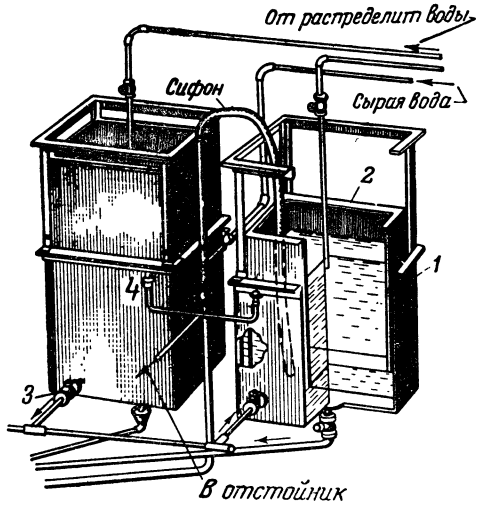


Рис. 8-8. Дозаторы-вытеснители поплавкового типа.

новки, так как должны устанавливаться над резервуаром, в который дозируется реагент, что относится к их недостатку. Эти дозаторы широко применяются на известковых и содоизвестковых установках.

Схема сифонного дозатора представлена на рис. 8-9. Раствор реагента из расходного бака *1* подводится к бачку *2*, в котором поддерживается постоянный уровень при помощи поплавкового регулятора. Сифонная трубка *3* тросом *4* связана с поплавком *5*. В бачок *6* вода поступает из водораспределителя *7* и уходит из него через отверстие *8*, живое сечение которого может изменяться конусом *9*. Последний может подниматься или опускаться вращением маховичка *10*. При установившемся режиме в бачок *6* поступает столько же воды, сколько и уходит из него. Если теперь нагрузка водоочистки увеличится, то уровень воды

в бачке *6* возрастет. Ввиду этого сифонная трубка погрузится в раствор на большую глубину и поступление реагента в воду увеличится пропорционально h:

$$V_p' = \mu f_{тр} \sqrt{2gh} \ [м^3/сек], \qquad (8\text{-}21)$$

где μ — коэффициент расхода $\approx 0{,}65$;
$f_{тр}$ — площадь сечения сифонной трубки, $м^2$;
h — глубина погружения сифонной трубки, $м$.

При уменьшении нагрузки водоочистки эти изменения пойдут в обратную сторону и расход раствора будет умень-

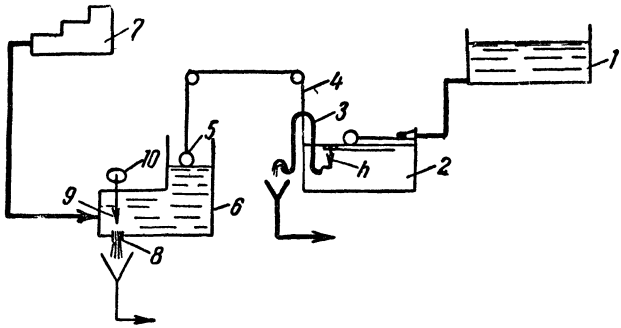


Рис. 8-9. Схема сифонного дозатора.

шен. Вытекающий из сифона раствор реагента и из бака *6* вода направляются далее в смеситель или камеру реакции.

Из дозаторов напорного типа наиболее часто применяют шайбовые, основанные на использовании перепада давления, создаваемого дроссельной диафрагмой (шайбой) (рис. 8-10). Если к шайбе подключить заполненный раствором закрытый бачок, *2*, то в него начнет поступать вода, вытесняя в трубопровод *4* соответствующий объем раствора, т. е. установится циркуляция жидкости, показанная стрелками. Между слоем воды *1* и раствора *3* образуется переходный слой, ограниченный некоторыми плоскостями *аб* и *а'б'*, концентрация реагента в котором изменяется от нуля (в плоскости *аб*) до заданной. Наличие этого слоя относится к недостатку шайбовых дозаторов, так как при совпадении плоскости *а'б'* с отверстием трубки *5* точность дозировки нарушается. Если температура раствора значи-

тельно отличается от температуры воды, высота переходного слоя может быть довольно значительной.

Если обозначить гидравлическое сопротивление всех коммуникаций, включая и дозатор $h_{гс}$, то при установившемся режиме работы будет иметь место равенство:

$$\Delta h = h_{гс} + h_p\left(\frac{\gamma_p}{\gamma_в} - 1\right) [м\ вод.\ ст.], \qquad (8\text{-}22)$$

из которого следует, что величина перепада, создаваемого шайбой, зависит от высоты расположения ее над уровнем раствора в дозаторе.

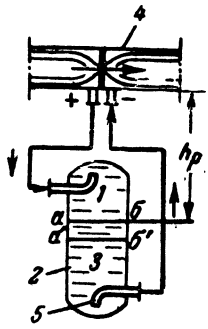


Рис. 8-10. Схема шайбового дозатора.

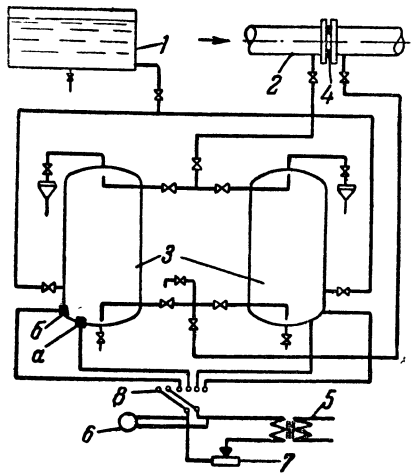


Рис. 8-11. Схема включения шайбового дозатора.

1 — бак с раствором реагента; *2* — трубопровод исходной воды; *3* — дозаторы; *4* — дроссельная шайба; *5* — трансформатор; *6* — вольтметр; *7* — реостат; *8* — переключатель.

Схема включения дозаторов показана на рис. 8-11. Заполнение дозаторов раствором производится из расходного бака *1*. Определение момента срабатывания всего раствора в дозаторе производится по вольтметру *6*. Когда между контактами *а* и *б* окажется слабый раствор или исходная вода, он покажет большее сопротивление, что служит указанием на необходимость перезарядки дозатора. Количество поступающей в дозатор воды может измеряться ротаметром.

Шайбовый дозатор можно включать и по схеме рис. 8-12, на которой цифрой *2* обозначен какой-либо элемент, имеющий достаточное гидравлическое сопротивление (экономайзер котла, теплообменник и т. п.). В этом случае раствор из дозатора *1* будет вытесняться в точку *б* за счет разности давлений $P_а$—$P_б$. Такой способ включения

часто наблюдается на практике, главным образом при вводе в котлы фосфата или щелочи. Он обладает, однако, тем недостатком, что при значительном перепаде давлений $P_а—P_б$ даже небольшое открытие регулировочного вентиля делает расход реагента весьма большим.

Насосы-дозаторы чаще всего выполняются в виде плунжерных насосов с регулируемым ходом плунжера.

в) Схемы коагуляционных установок

Применяют две принципиально отличные схемы коагуляционных установок: коагуляция в отстойнике и коагуляция на осветлительных фильтрах (прямоточная схема). Схема с отстойниками будет рассмотрена ниже (§ 9-5). Прямоточная схема коагуляционной установки представлена на рис. 8-13. Обрабатываемая вода насосом *1* подается в поверхностный теплообменник *2*, где подогревается паром или горячей водой *9* до 35—40° С. Количество воды измеряется расходомером *3*. К дроссельной диафрагме подключены шайбовые дозаторы щелочи *5* и коагулятора *6*. Для каждого реагента устанавливается по два дозатора, из которых один находится в работе, другой—в перезарядке. Образующиеся осадки удаляются в осветлительных фильтрах *7*. В некоторых случаях (для труднокоагулируемых вод) перед осветлительными фильтрами устанавливается смеситель *8*. Он представляет собой полый бак, подобный фильтру, в котором вода движется снизу вверх с такой скоростью, чтобы исключить возможность оседания и накопления в нем осадков. Назначение смесите-

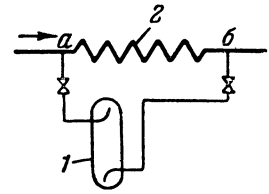


Рис. 8-12. Схема включения шайбового дозатора без шайбы.

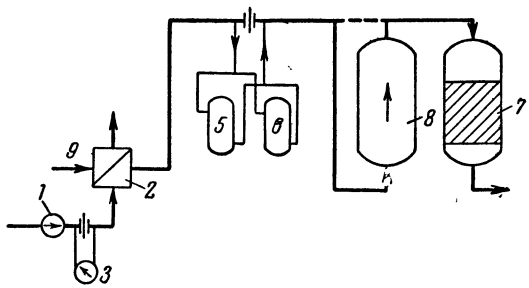


Рис. 8-13. Схема прямоточной коагуляционной установки.

ля заключается в обеспечении лучшего перемешивания воды и реагентов и увеличении времени протекания процесса коагуляции.

8-3. Обезмасливание конденсата

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

Загрязнение маслом конденсата, получаемого от потребителей второй группы, носит другой характер. Здесь масло попадает только в конденсат в период неисправности теплообменных аппаратов (нарушение плотности вальцовки трубок в трубных досках, разрыв трубок), когда через образовавшуюся неплотность масло поступает в междутрубное пространство, где находится конденсат (если давление масла превышает давление пара). В нормальном же случае 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. с обезмасливания пара. Оно производится в аппаратах, называемых пароочистителями. В основу их работы кладется сочетание следующих принципов: выбрасывания капелек масла из парового потока при резких его поворотах или круговой траектории движения и прилипания их к поверхности перегородок (насадок, цепей и др.) при ударе о них пара. Пароочистители снижают содержание масла в паре до 10—15 *мг/л*. Более глубокое обезмасливание пара достигается в паропромывателях, в которых он барботирует че-

рез слой воды, содержащий коагулятор или без него. Остаточное содержание масла в этом случае снижается до 3—5 *мг/л*.

Обезмасливание конденсата производится на специальной обезмасливающей установке, схема которой приведена на рис. 8-14. Замасленный конденсат *6* поступает в сборный бак-отстойник *1*, в котором происходит отделение капельного масла от воды, т. е. отстаивание конденсата. Собирающееся сверху масло отводится из бака в сборник. Насосом *2* конденсат вначале подается на осветительные фильтры *3*,

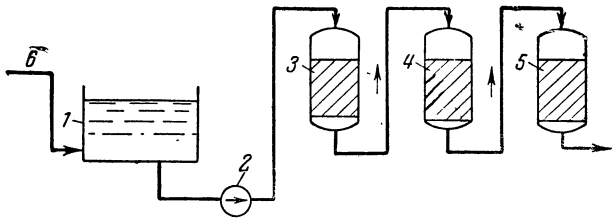


Рис. 8-14. Схема обезмасливающей установки.

загружаемые дробленым коксом или антрацитом с размером зерен 1—2 *мм*. В них удаляется масло, содержащееся в конденсате в виде капель. После осветлительных фильтров конденсат поступает на сорбционные фильтры *4*, загружаемые активированным углем. Активированный уголь отличается сильно развитой поверхностью, образованной стенками пронизывающих его пор и каналов. Ввиду этого он обладает сильно выраженной способностью поглощать (адсорбировать) различные вещества, в том числе и масла. Поэтому в сорбционных фильтрах происходит глубокая очистка конденсата от масла до остаточного содержания его, не превышающего 0,5—1 *мг/л*. Существует много марок активированного угля. Лучшими показателями обладает древесный уголь марки БАУ, он поглощает масла до 25% от собственного веса, составляющего 0,21 *т/м*^{3}.

При прохождении осветлительных и сорбционных фильтров жесткость конденсата часто значительно возрастает. В этих случаях после сорбционных фильтров устанавливаются умягчительные (катионитные) фильтры *5*, снижающие жесткость конденсата. Причина возрастания жесткости конденсата после осветлительных и сорбционных фильтров заключается в растворении зольных примесей, содержащихся в коксе и активированном угле. Скорость фильтрования конденсата составляет порядка 5 *м/ч*.

Глава девятая

ОБРАБОТКА ВОДЫ МЕТОДОМ ОСАЖДЕНИЯ НАКИПЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

9-1. Процессы умягчения и расход реагентов

а) Способы обработки

Умягчением воды называется удаление из нее катионов кальция и магния

Умягчение воды методом осаждения накипеобразователей основано на связывании катионов кальция и магния ионами CO_3^{2-} и OH^- с образованием труднорастворимых соединений $CaCO_3$ и $Mg(OH)_2$, выпадающих в осадок и удаляемых из воды. Ионы CO_3^{2-} и OH^- вводятся в обрабатываемую воду с различными реагентами-осадителями, в качестве которых применяют: негашеную (CaO) или гашеную [$Ca(OH)_2$] (пушонка) известь, едкий натр (каустическая сода) NaOH, углекислый натрий (кальцинированная сода) Na_2CO_3. Эти реагенты могут применяться как каждый в отдельности, так и в различной комбинации. В зависимости от этого различают следующие способы обработки воды:

Способ обработки	Применяемые реагенты
Известковый	Только известь
Содоизвестковый	Na_2CO_3+CaO
Едконатровый	NaOH
Содоедконатровый	Na_2CO_3+NaOH
Известковоедконатровый	$CaO+NaOH$

б) Известкование

Известкование применяется в тех случаях, когда необходимо снизить щелочность исходной воды. Достаточно глубокого умягчения воды при этом не достигается. Процессы, имеющие место при обработке воды известью, могут быть представлены схематично следующими уравнениями в молекулярной форме:

$$\left.\begin{array}{c} Ca(HCO_3)_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow 2\downarrow CaCO_3 + 2H_2O; \\ Mg(HCO_3)_2 + 2Ca(OH)_2 \rightarrow \downarrow Mg(OH)_2 + 2CaCO_3 + 2H_2O; \\ MgCl_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow \downarrow Mg(OH)_2 + CaCl_2; \\ MgSO_4 + Ca(OH)_2 \rightarrow \downarrow Mg(OH)_2 + CaSO_4; \\ CO_2 + Ca(OH)_2 \rightarrow \downarrow CaCO_3 + H_2O. \end{array}\right\} \quad (9\text{-}1)$$

В ионной форме эти процессы могут быть представлены проще:

$$\left.\begin{aligned} HCO_3^- + OH^- &\rightarrow CO_3^{2-} + H_2O;\\ Ca^{2+} + CO_3^{2-} &\rightarrow \downarrow CaCO_3;\\ Mg^{2+} + 2OH &\rightarrow \downarrow Mg(OH)_2;\\ CO_2 + 2OH^- &\rightarrow CO_3^{2-} + H_2O. \end{aligned}\right\} \quad (9\text{-}1а)$$

Из рассмотрения этих реакций следует, что при известковании карбонатная жесткость (щелочность) исходной воды разрушается и величина ее снижается до 0,7—1 *мг-экв/л*; происходит удаление из воды магниевой жесткости, если ведется гидратный режим с достаточным избытком OH^-; удаляется растворенная в воде углекислота; сухой остаток известкованной воды снижается; жесткость известкованной воды также уменьшается и становится равной примерно:

$$H_{из} = H_{нк} + (0{,}7 \div 1{,}0)\ мг\text{-}экв/л. \quad (9\text{-}2)$$

Остаточная щелочность ее будет равна примерно:

$$Щ_{из} = (0{,}7 \div 1{,}0) + \alpha\ мг\text{-}экв/л, \quad (9\text{-}3)$$

где α — избыток $Ca(OH)_2$, обычно применяемый в пределах 0,2 — 0,3 *мг-экв/л*.

Результаты известкования щелочных вод, для которых $H_0 < Щ_0$, будут другими. Для них разность $Щ_0 - H_0$ будет характеризовать концентрацию бикарбоната натрия $NaHCO_3$. При взаимодействии с известью в зависимости от величины ее дозы бикарбонат натрия будет переходить в кальцинированную соду или едкий натр:

$$\left.\begin{aligned} 2NaHCO_3 + Ca(OH)_2 &\rightarrow \downarrow CaCO_3 + Na_2CO_3 + 2H_2O;\\ 2NaHCO_3 + 2Ca(OH)_2 &\rightarrow \downarrow 2CaCO_3 + 2NaOH + 2H_2O. \end{aligned}\right\} \quad (9\text{-}4)$$

Следовательно, остаточная щелочность известкованной воды в этом случае будет примерно равна:

$$Щ_{из} = Щ_0 - H_0 + \alpha\ [мг\text{-}экв/л]. \quad (9\text{-}5)$$

Снижение щелочности щелочных вод может быть достигнуто присадкой в обрабатываемую воду совместно с известью нейтральных солей кальция, например $CaCl_2$ (если желают вести обработку воды только известкованием). Тогда

$$\left.\begin{aligned} 2NaHCO_3 + Ca(OH)_2 &\rightarrow \downarrow CaCO_3 + Na_2CO_3 + 2H_2O;\\ Na_2CO_3 + CaCl_2 &\rightarrow \downarrow CaCO_3 + 2NaCl. \end{aligned}\right\} \quad (9\text{-}6)$$

Однако такой способ связан с некоторым увеличением сухого остатка воды.

Снижение сухого остатка известкованной воды происходит за счет удаления $CaCO_3$ и $MgCO_3$, которые входят в состав сухого остатка исходной воды, а также за счет частичного удаления из обрабатываемой воды различных коллоидных веществ. В некоторых случаях знание величины сухого остатка известкованной воды является важным. Если не требуется высокая точность, то приближенную величину его можно определить по следующим формулам, в которые входят величины, обычно содержащиеся в сокращенном анализе воды:

$$S_{из} = S_{св} - 50\,(H_к - Щ_к^{из}) + 8H_{Mg}\ [мг/л]; \qquad (9\text{-}7)$$

$$S_{из} = S_{св} - 50\,(H_{Ca} - Щ_к^{из}) - 42\,(H_к - H_{Ca}) + \\ + 8H_{нк}\ [мг/л], \qquad (9\text{-}8)$$

где $S_{св}$ — сухой остаток исходной воды, *мг/л*;

$Щ_к^{из}$ — карбонатная щелочность известкованной воды, *мг-экв/л*.

Первая формула выведена для природных нещелочных вод с величиной отношения $(Ca^{2+}) : (HCO_3^-) > 1$, вторая — для вод с отношением $(Ca^{2+}) : (HCO_3^-) < 1$. Точность этих формул во многих случаях лежит в пределах 5—10%.

Расход 100%-ной извести $g_{из}$ для вод первой группы с $H_0 > Щ_0$ определяется формулой

$$g_{из} = 28\,(H_к + H_{Mg} + H_{CO_2} + \alpha) = \\ = 28R_{из}\ [мг/л\ (г/м^3)], \qquad (9\text{-}9)$$

где величина $R_{из}$ обозначает дозу извести в *мг-экв/л*.

Расчет технической извести $g_{из}^m$ может быть найден из следующих формул:

$$g_{из}^m = \frac{2\,800R_{из}}{C_{из}}\ [мг/л], \qquad (9\text{-}10)$$

или

$$g_{из}^{m'} = \frac{2{,}8Q_{бр}R_{из}}{C_{из}}\ [кг/ч], \qquad (9\text{-}11)$$

где $C_{из}$ — содержание CaO в техническом продукте, которое не должно быть ниже 60%.

При известковании щелочных вод доза извести будет определяться выражением (гидратный режим):

$$R_{из} = 2Ш_0 + H_{Mg} - H_0 + \alpha. \qquad (9\text{-}12)$$

Если необходимо снизить щелочность известкованной воды до заданной величины $Ш_{ост} < (Ш_0 - H_0)$, необходимо вводить в воду $CaCl_2$ в количестве $(Ш_0 - H_0 - Ш_{ост})$ [*мг-экв/л*].

в) Содоизвесткование

В отличие от известкования в этом способе достигается умягчение воды до 300 ÷ 400 *мкг-экв/л*. При высоком подогреве для некоторых вод можно получить остаточную жесткость порядка 200 *мкг-экв/л*. Известью удаляется $H_к$, H_{Mg} и CO_2. Жесткость некарбонатная, состоящая после известкования главным образом из соединений кальция, удаляется кальцинированной содой:

$$Ca^{2+} + CO_3^{2-} \rightarrow CaCO_3. \qquad (9\text{-}13)$$

Расход соды определяется формулой

$$g_c = 53\,(H_{нк} + \beta)\ [мг/л], \qquad (9\text{-}14)$$

или

$$g'_c = \frac{5{,}3 Q_{бр}\,(H_{нк} + \beta)}{C_c}\ [кг/ч], \qquad (9\text{-}15)$$

где β — избыток соды над стехиометрическим количеством, принимаемый в пределах 1 ÷ 1,5 *мг-экв/л*;

C_c — содержание Na_2CO_3 в техническом продукте, %.

Содоизвесткование проводится при подогреве обрабатываемой воды до 90 — 95° С (горячий способ). Для вод щелочных этот способ обработки неприменим.

г) Обработка воды едким натром и содой

Взаимодействие NaOH с соединениями кальция и магния можно представить схематично следующими реакциями в молекулярной форме:

$$\left.\begin{array}{r}
Ca(HCO_3)_2 + 2NaOH \rightarrow \downarrow CaCO_3 + Na_2CO_3 + 2H_2O;\\
Mg(HCO_3)_2 + 2NaOH \rightarrow MgCO_3 + Na_2CO_3 + 2H_2O;\\
MgCO_3 + 2NaOH \rightarrow \downarrow Mg(OH)_2 + Na_2CO_3;\\
CaCl_2 + Na_2CO_3 \rightarrow \downarrow CaCO_3 + 2NaCl;\\
CaSO_4 + Na_2CO_3 \rightarrow \downarrow CaCO_3 + Na_2SO_4;\\
CO_2 + 2NaOH \rightarrow Na_2CO_3 + H_2O;\\
MgCl_2 + 2NaOH \rightarrow \downarrow Mg(OH)_2 + 2NaCl;\\
MgSO_4 + 2NaOH \rightarrow \downarrow Mg(OH)_2 + Na_2SO_4.
\end{array}\right\} \quad (9\text{-}16)$$

В ионной форме реакции будут идентичны приведенным (9-1а).

Особенностью процесса обработки воды едким натром является образование кальцинированной соды в результате взаимодействия NaOH с бикарбонатами кальция и магния. Количество образующейся при этом Na_2CO_3 будет равно $2H_к$ [*мг-экв/л*]. Если избыток ионов CO_3^{2-} в обработанной воде равен β [*мг-экв/л*], то умягчение воды одним едким натром становится целесообразным при условии, что для исходной воды имеет место равенство

$$2H_к + H_{CO_2} = H_{Ca} + \beta. \quad (9\text{-}17)$$

Левая часть равенства определяет количество образующихся ионов CO_3^{2-}, правая характеризует величину потребности в них для данной воды. Если $(2H_к + H_{CO_2}) > (H_{Ca} + \beta)$, то становится необходимым добавлять в обрабатываемую воду CaO для связывания избыточных ионов CO_3^{2-}, т. е. обработка в этом случае ведется двумя реагентами: CaO+NaOH. Когда $(2H_к + H_{CO_2}) < (H_{Ca} + \beta)$, недостаток ионов компенсируется введением в воду кальцинированной соды, т. е. обработка производится сочетанием реагентов $NaOH + Na_2CO_3$. Расход реагентов можно определить по следующим формулам:

Способ обработки	Расход реагентов, *г/м*³	
Едконатровый	$(NaOH) = 40(H_к + H_{Mg} + H_{CO_2} + \alpha)$	(9-18)
Содоедконатровый	$(NaOH) = 40(H_к + H_{Mg} + H_{CO_2} + \alpha)$	
	$(Na_2CO_3) = 53(H_{Ca} - (2H_к + H_{CO_2}) + \beta)$	
Известковоедконатровый	$(CaO) = 28(2H_к + H_{CO_2} - H_{Ca} - \beta)$	
	$(NaOH) = 40(H_{HK} + \alpha + \beta)$	

9-2. Аппаратура известковых установок

а) Водораспределитель

Водораспределитель является важным элементом дозирующих устройств на установках, применяющих дозаторы безнапорного типа. Он предназначен для автоматического

деления поступающего в него потока воды на заданные три части. Это достигается использованием водослива и отсекающих перегородок (рис. 9-1).

Сырая вода *1* поступает в отделение *2*, проходит горизонтальную успокоительную решетку и переливается через порог (водослив) *3*. Здесь перегородками поток воды делится на три части: часть *4* поступает в сатуратор *5*, часть *6* — в подогреватель *7* и часть *8* — на первый неподвижный водослив *9*. Последний, если он используется для дозаторов вытеснителей поплавкового типа, делит поток на m струй, из которых одна направляется на второй неподвижный водослив *11*, который делит ее на n частей. Из них n—1 частей направляется в смеситель *10*, одна — *12* поступает к дозаторам *13*, откуда вместе с реагентом также поступает в смеситель *10*, отсюда вода с реагентами *14* направляется в отстойник. Произведение $N_c = mn$ называется постоянной водораспределителя.

Величина отсекаемых перегородками потоков *4* («известковая перегородка» $L_{из}$) и *8* («содовая перегородка» L_c) зависит от качества обрабатываемой воды. Шкалой, прикрепленной над порогом *3* водораспределителя, поток делится на 100 частей. Тогда численное значение перегородок будет означать проценты или число делений на шкале. Оно может быть найдено по формулам:

$$L_{из} = \frac{R_{из}}{R_{из} + K_{из}} \ 100 \ [\%]$$

и

$$L_c = \frac{R_c N_c}{K_c} \ 100 \ [\%], \qquad (9\text{-}19)$$

где R_c — доза соды, равная $(H_{нк} + \beta)$, *мг-экв/л*;

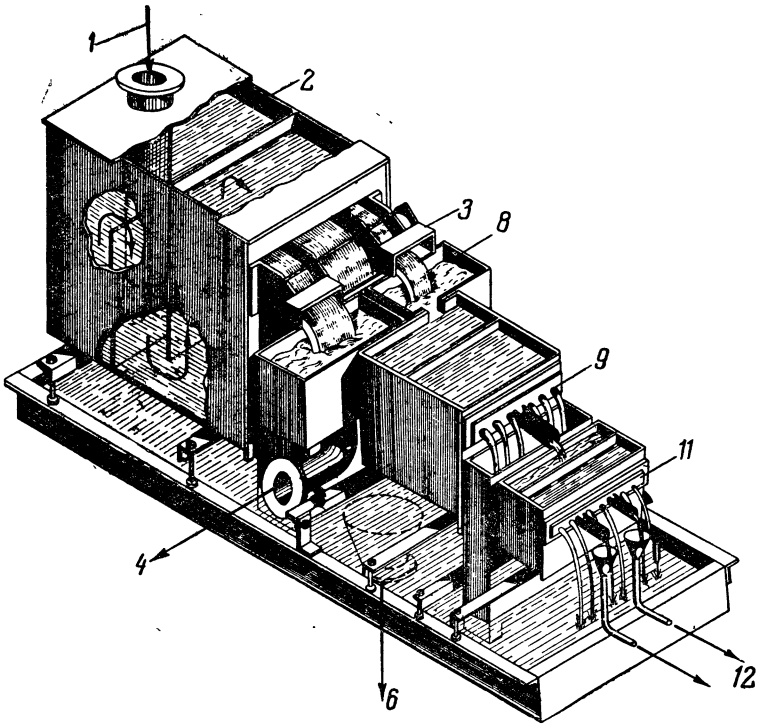
$K_{из}$, K_c — концентрация раствора соответственно извести и соды, *мг-экв/л*.

Эти формулы получены решением относительно $L_{из}$ и L_c следующих балансовых равенств:

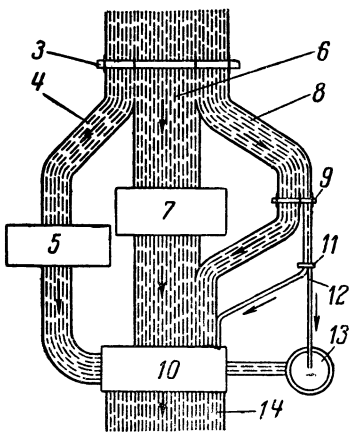
$$Q_{бр} \frac{L_{из} K_{из}}{100} = R_{из} Q_{бр} \left(\frac{100 - L_{из}}{100} \right)$$

и

$$\frac{L_c Q_{бр} K_c}{100 N_c} = R_c Q_{бр}, \qquad (9\text{-}20)$$



а)



б)

Рис. 9-1. Водораспределитель.
а — общий вид; *б* — схема потоков воды

левые части которых характеризуют количество реагента (CaO и Na_2CO_3), дозируемое в обрабатываемую воду при данном значении $L_{из}$ и L_c, правые — потребность обрабатываемой воды в реагенте.

По этим формулам рассчитывается первоначальное (при пуске установки) значение перегородок. В последующем величины $L_{из}$ и L_c корректируют по данным анализа обработанной воды, которым обычно определяется щелочность по фенолфталеину и общую. Соотношение между $Ш_ф$, $Ш_о$ и остаточной жесткостью обработанной воды $H_о$ позволяет составить представление о том, какие необходимы изменения в дозировке реагентов, и оценить качество воды.

Водораспределитель позволяет определить и производительность водоподготовительной установки с точностью примерно до 3 — 5% по формуле

$$Q_{бр} = \frac{6Nq'}{L_в} \ [м^3/ч], \qquad (9\text{-}21)$$

где q' — количество воды, поступающей в поплавок дозатора-вытеснителя, *л/мин*.

б) Сатуратор

Сатуратор предназначен для получения прозрачного насыщенного раствора извести. Он представляет собой цилиндрический сосуд *1* (рис. 9-2), заканчивающийся коническим днищем *2* с углом при вершине 60°. Внутри сатуратора устроено второе днище *3* с тем же углом конуса, при помощи которого образуются две камеры—верхняя и нижняя — с отношением объемов как 2 : 1. Эти камеры сообщаются друг с другом при помощи шарового (или иной конструкции) перепускного клапана *4*, перекрывающего отверстие во внутреннем днище.

В верхней камере расположена центральная труба *6*, заканчивающаяся коническим раструбом *7*, предназначенным для улавливания пузырьков воздуха, выделяющегося из воды. Без этого может иметь место взмучивание раствора в верхней камере. Верх сатуратора закрывается железными листами.

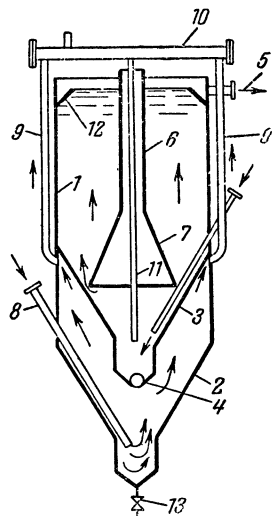


Рис. 9-2. Сатуратор.

Вновь смонтированный сатуратор испытывается на герметичность путем заполнения его водой. Пуск сатуратора начинается с загрузки в него технической извести, количество которой определяется по формуле

$$g_{из}^{т} = \frac{2{,}8 Q_б R_{из} T_{сат}}{C_{из}} \ [кг], \qquad (9\text{-}22)$$

где $T_{сат}$ — время работы сатуратора между перезарядками, *ч*.

Это количество извести в виде густой суспензии, именуемой *известковым молоком*, подается насосом в верхнюю камеру сатуратора, из которой перепускается в нижнюю. После заполнения последней заполняется верхняя камера и уровень воды доводится до переливных желобов.

Для включения сатуратора в работу в нижнюю камеру его по трубе *8* направляется поток воды, отсекаемый известковой перегородкой. Здесь вода растворяет известь и в виде ненасыщенного раствора по перепускным трубам *9* поступает в коллектор *10*. Отсюда по трубе *11* ненасыщенный раствор извести опускается в нижнюю часть верхней камеры, где и происходит полное его насыщение. Насыщенный раствор поднимается вверх, переливается через переливные (сборные) желоба *12* и уходит в отстойник. Сборные желоба предназначены для равномерного отбора раствора, чтобы обеспечить одинаковую нагрузку всей площади сатуратора ($м^3/м^2 \cdot ч$). Нарушение этого условия ухудшает его работу.

По истечении некоторого времени концентрация известкового раствора из нижней камеры начинает уменьшаться. Это указывает на то, что внесенное в нижнюю камеру количество извести израсходовано и сатуратор нуждается в перезарядке, которая производится при уменьшении концентрации раствора до 15—18 *мг-экв/л*. При перезарядке сатуратор выводится из работы, что связано с остановкой всей водоподготовительной установки или одного блока сатуратор — отстойник. Открытием задвижки *13* из нижней камеры удаляется шлам до тех пор, пока не появится светлая вода. После этого задвижка *13* закрывается, открывается перепускной клапан и неизрасходованная известь из верхней камеры перепускается в нижнюю. В верхнюю камеру по трубе *14* загружается новая порция извести в количестве, определяемом формулой.

Концентрация раствора извести, выдаваемого сатуратором, зависит от температуры следующим образом:

Температура, °С	0	10	20	30	40	50	60	70	80
Растворимость:									
мг/л	1 430	1 330	1 230	1 130	1 040	950	860	760	670
мг-экв/л	51	47,5	44	40,4	37,2	33,9	30,7	27,2	23,9

Количество воды, поступающее в сатуратор, т. е. производительность сатуратора $Q_{сат}$, зависит от качества исходной воды и производительности водоподготовительной установки $Q_{бр}$ и определяется формулой

$$Q_{сат} = \frac{L_{из}}{100} Q_{бр} \ [м^3/ч]. \qquad (9\text{-}23)$$

С другой стороны, $Q_{сат} = F_{сат} v_{сат}$, откуда

$$v_{сат} = \frac{L_{сат} Q_{бр}}{100 F_{сат}} \ [м/ч]. \qquad (9\text{-}24)$$

Объем сатуратора должен быть равен $V_{сат} = t_{сат} Q_{сат}$ $[м^3]$. В этих выражениях $t_{сат}$ обозначает время пребывания раствора в сатураторе, принимаемое в расчетах в пределах 8—10 *ч*, и $v_{сат}$ — скорость подъема раствора, находящаяся в границах 0,8 — 1 *м/ч*. Меньшие значения принимаются для вод, магниевая жесткость которых меньше половины общей.

в) Отстойник

Отстойник (осветлитель) является основным аппаратом установок, работающих по методу осаждения накипеобразователей. Он состоит (рис. 9-3) из цилиндрического металлического корпуса *1*, конического днища *2*, центральной трубы *3*, присоединенной внизу к раструбу *4* и вверху к смесителю *5*. Вода и реагенты подаются в смеситель, в котором кладется начало процессам умягчения воды. Отсюда вода поступает по центральной трубе вниз отстойника. Здесь, изменив направление, она начинает медленное движение вверх к переливным желобам *6*. Как и в сатураторе, конический раструб *4* предназначен для отвода пузырьков воздуха с целью устранения взмучивания воды. Собирающийся на дне отстойника шлам периодически выводится из него в канализацию через задвижку *7*.

Производительность отстойника $Q_{от}$ равна произведению скорости подъема воды $v_{от}$ [м/ч] на площадь поперечного сечения его $F_{от}$, т. е.

$$Q_{от} = v_{от} F_{от} \ [м^3/ч]. \qquad (9\text{-}25)$$

Объем отстойника определяется выражением

$$V_{от} = t_{от} Q_{бр}, \qquad (9\text{-}26)$$

где $t_{от}$ — время пребывания воды в отстойнике, *ч*.

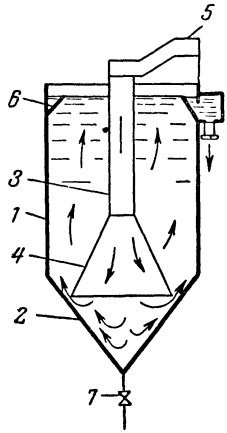


Рис. 9-3. Отстойник.

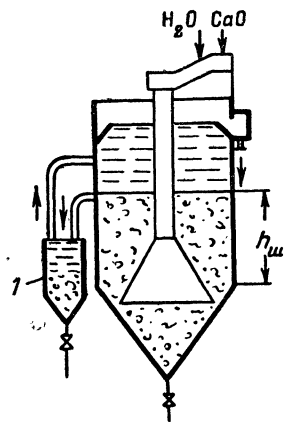


Рис. 9-4. Отстойник со слоем шлама и вынесенным шламоуплотнителем.

Численные значения $t_{от}$ и $V_{от}$ зависят от температуры воды и принимаются при расчете согласно следующим данным:

Температура умягчаемой воды, °С	Длительность пребывания воды в отстойнике, *ч*	Скорость подъема воды в отстойнике, *м/ч*
20	5	1,5
20—30	4	2,0
30—60	3	2,5
60—85	2—2,5	2,75
85—90	1,5—2	3—3,5

9-3. Способы улучшения работы отстойников

Отстойник является громоздким аппаратом. Это обусловлено малыми скоростями движения воды в отстойнике, зависящими от скорости процессов, протекающих в нем.

Ввиду этого изыскание способов интенсификации этих процессов, а тем самым и уменьшения габаритов отстойника, является весьма актуальной задачей.

Было установлено (проф. Азерьером С. Х. в 1930 г.), что накопление в отстойнике шлама, взвешенного в восходящем потоке воды и образующего подобие шламового «облака», значительно ускоряет процесс формирования осадка. Оно способствует укрупнению частичек проходящего сквозь него осадка и задерживает их подобно фильтру. В связи с этим начали практиковать работу отстойников на режиме зашламления, т. е. с накопленным слоем взвешенного шлама. Это позволило заметно увеличить производительность отстойников и повысить качество обработанной воды по осветленности.

Позже был найден другой способ интенсификации работы отстойников. Он основан на использовании способности $CaCO_3$ кристаллизоваться непосредственно на твердой поверхности, в том числе и на поверхности частичек осадка. В этом способе реагенты подаются в объем конусного днища отстойников, заполненного взвешенным шламом. В этих условиях процесс выделения из раствора $CaCO_3$ идет весьма быстро, заканчиваясь через 3—5 *мин.*

Одним из способов интенсификации работы отстойников является создание в нем слоя взвешенного шлама. Он состоит в том, что в отстойнике накапливается слой шлама $h_ш$ (рис. 9-4), сквозь который проходит обрабатываемая вода, поддерживая его во взвешенном состоянии. Уровень шлама поддерживается при помощи выносного шламоуплотнителя (шламоотделителя) *1*, через который идет медленная циркуляция воды, показанная на рис. 9-4 стрелками. В результате этой циркуляции шлам непрерывно оттягивается в шламоуплотнитель и остается в нем. Периодически шлам удаляется из него в канализацию.

Широкое применение нашел способ подачи реагентов в зону шлама (метод Новотульского завода). Он состоит в том, что воду и реагенты подводят в отстойник снизу, т. е. в объем конусного днища. Здесь концентрация шлама наибольшая и процессы кристаллизации $CaCO_3$ идут с наибольшей скоростью. Карбонат кальция выделяется на частичках шлама, которые за счет этого увеличиваются в размерах. Образуется зернистый кристаллический быстро оседающий шлам, что способствует быстрому осветлению воды.

Подача реагентов в зону шлама наиболее эффективна при обработке вод с отношением $(Ca^{2+}) : (HCO_3^-) > 1$.

Для вод с $(Ca^{2+}) : (HCO_3^-) < 1$ результаты обработки менее удовлетворительны. Это объясняется тем, что в первом случае выпадает в основном $CaCO_3$, быстро кристаллизующийся на зернах шлама. Во

втором — в осадок выпадает и $Mg(OH)_2$, не обладающий такими свойствами. Поэтому шлам, содержащий в значительном количестве гидроокись магния, обладает рыхлой структурой и медленной осаждаемостью.

Конструктивно этот способ оформляется различно. На рис. 9-5 представлен отстойник с удаленной центральной трубой. Реагенты и вода подводятся в низ конусного днища таким образом, чтобы создать вращательное движение жидкости (тангенциально). В центре отстойника установлен шламонакопитель, в котором прорезаны отверстия («окна») для входа шлама. Подвижной трубой эти окна можно закрывать или открывать, соответственно понижая или повышая уровень шлама и режим его отвода. Отсутствие центральной трубы предполагает тщательное удаление из воды газов до поступления ее в отстойник. Эту задачу обычно выполняет устройство, изображенное на рис. 9-5 и заключающееся в том, что вода или известковый раствор направляется в низ стакана *8*; при спокойном подъеме с небольшой скоростью создаются необходимые условия для выделения газов.

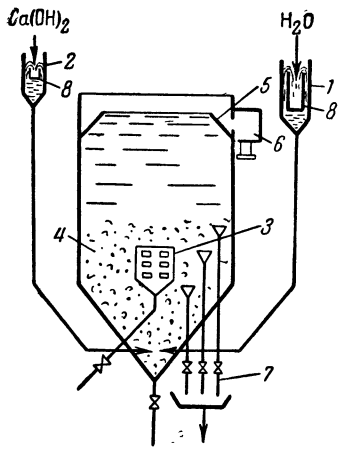


Рис. 9-5. Отстойник с подачей реагентов в зону шлама, без центральной трубы и с расположенным внутри шламоуплотнителем.

1, 2 — воздухоотделители для воды и известкового раствора; *3* — шламоуплотнитель; *4* — слой шлама; *5* — переливные желоба; *6* — приемный карман; *7*— пробоотборные краники; *8* — стакан.

Схема отстойника более сложной конструкции (предложенная канд. техн. наук Кургаевым Е. Ф.), известная под названием отстойника ЦНИИ МПС*, представлена на рис. 9-6. Корпус его состоит из двух цилиндров разного диаметра, соединенных переходом, имеющим форму усеченного конуса. Вода *1* и реагенты *2* вводятся тангенциально вниз конусного днища. Для гашения вращательного движения служат вертикальные дырчатые перегородки *3*. Отвод шлама в шламоуплотнитель *4* осуществляется через центральную трубу с отверстиями. Подвижной трубой *6*

* Центральный научно-исследовательский институт Министерства путей сообщения.

шламовые окна в трубе *5* перекрываются, чем регулируется высота слоя шлама. Решетки *7* и *8* служат для выравнивания потока воды по площади цилиндра. Эти отстойники широко используются на водоподготовительных установках. Недостатком их служит сложность конструкции.

Качество работы отстойника во многом зависит от его гидравлической характеристики, определяемой коэффициентом использования объема отстойника $\eta_{от}$. Под этим понимают отношение фактического времени пребывания в нем воды $t_{от}^{ф}$ к теоретическому $t_{от}^{т}$:

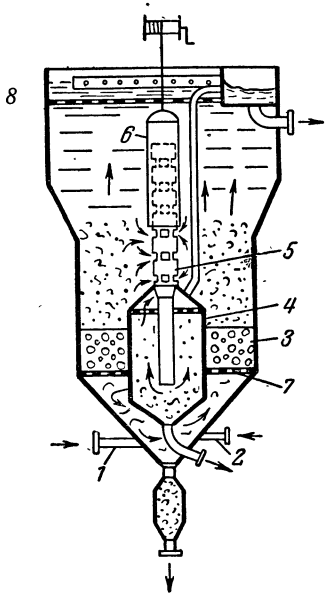


Рис. 9-6. Отстойник ЦНИИ МПС-1 (системы Кургаева Е. Ф.).

$$\eta_{от} = \frac{t_{от}^{ф}}{t_{от}^{т}}. \qquad (9\text{-}27)$$

Из формул (9-27), (9-25) и (9-26) получим:

$$t_{от}^{т} = \frac{V_{от}}{V_{от} F_{от}}. \qquad (9\text{-}28)$$

Это равенство определяет идеальные условия работы, когда скорость подъема воды одинакова по всему сечению отстойника. В действительности $t_{от}^{т} > t_{от}^{ф}$. Это значит, что площадь отстойника загружена неравномерно, на отдельных ее участках вода поднимается со скоростью, значительно большей расчетной. Поэтому на практике принимаются различные меры для выравнивания этих скоростей. Одна из них заключается в том, что в отстойнике устанавливаются решетки, перекрывающие сечение его. Они создают некоторое небольшое сопротивление проходу воды, чем и достигается выравнивание ее движения. Такие решетки целесообразно устанавливать вверху отстойника, т. е. в зоне осветленной воды, чтобы исключить занос их шламом. Существенно важно также обеспечить равномерный отбор воды по сечению отстойника, что достигается рациональной конструкцией и расположением переливных желобов.

9-4. Способы приготовления и дозирования известкового молока

Известковым молоком называется взвесь твердых нерастворившихся частичек извести $Ca(OH)_2$ (суспензия) в насыщенном известковом растворе, консистенция и цвет которой напоминают молоко. На установках небольшой производительности, оборудованных сатураторами, оно приготовляется в гидравлических мешалках (рис. 9-7). Негашеная известь CaO загружается в гасильный ящик *1*, заливается водой и оставляется на 2—4 *ч*, в течение которых происходит процесс гашения извести:

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2.$$

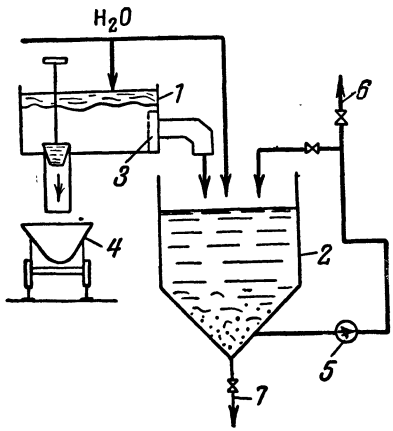


Рис. 9-7. Схема приготовления известкового молока в мешалке.

1 — гасильный ящик; *2* — мешалка; *3* — сетка для задержания нерастворившегося балласта; *4* — вагонетка для балласта; *5* — циркуляционный насос; *6* — в сатуратор; *7* — канализация.

Эта реакция идет с выделением тепла (345 *ккал/кг* CaO), вследствие чего при гашении извести происходят разогрев всей массы и испарение воды. Поэтому гасильные устройства стремятся изолировать от других помещений или оборудовать вытяжной вентиляцией. По окончании процесса гашения образовавшееся «тесто» размывают водой и спускают в мешалку *2*. Оставшиеся в гасильном ящике нерастворившиеся и невымытые примеси (балласт) удаляют в отвал. Слущенное в мешалку густое известковое молоко разбавляют водой, размешивают насосом и подают в сатуратор.

Схема, представленная на рис. 9-8, является более совершенной. Она предусматривает подачу извести со склада тельфером *1* в специальных сетчатых корзинах *2*, которые устанавливаются в гасильном баке *3*. После установки корзины с известью бак герметично закрывается и в него снизу по трубе *4* подается под напором вода. Поднимаясь

вверх, она гасит и размывает известь, после чего через карманы *5* переливается в мешалку *6*. Для ускорения процесса размывание извести ведут также циркуляционным насосом через отвод *7*. Оставшийся в корзине балласт удаляется тельфером вместе с корзиной и сбрасывается в отвал. Освободившаяся корзина вновь заполняется известью.

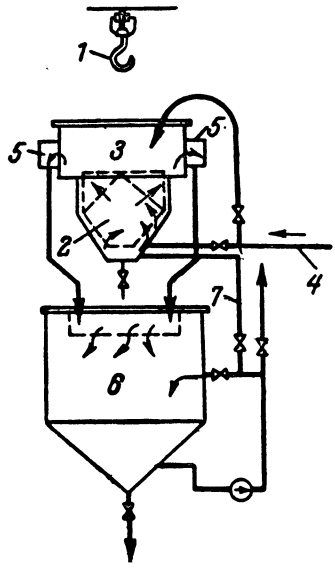


Рис. 9-8. Схема установки для приготовления известкового молока.

Эта схема не может, однако, удовлетворить современные известковые установки большой производительности. Основной ее недостаток заключается в том, что не предусмотрена механизация загрузки известью корзины. Этот недостаток полностью устранен в схемах, приведенных на рис. 9-9 и 9-10, в которых предусмотрена максимальная механизация всех процессов. Схема рис. 9-9 допускает доставку извести навалом в вагонах, из которых она после дробилки *1* подается ковшовым элеватором *2* в приемные бункера *3*. Из бункеров известь поступает в гасильный вращающийся барабан *5*. Готовое известковое молоко собирается в баках *6*, обладающих достаточным объемом. Рабочая концентрация молока готовится в мешалках.

В схеме рис. 9-10 предусматривается подача извести на водоподготовительную установку автотранспортом в специальных контейнерах, заполняемых на известковом заводе. Перемещение контейнеров на установке производится электротельфером. Для гашения и вымывания извести применена установка, аналогичная изображенной на рис. 9-7. Эта схема в значительной мере исключает образование известковой пыли, что является существенным ее преимуществом.

Дозирование извести в обрабатываемую воду наиболее просто осуществляется при помощи сатуратора. Однако громоздкость этого аппарата является большим его недо-

статком, препятствующим применению его на установках большой производительности. Такие установки сооружаются без сатураторов.

На бессатураторных известковых установках известь дозируется в виде известкового молока при помощи дозаторов, включенных в циркуляционный контур известковых мешалок (рис. 9-11). Баки-мешалки *5* служат для приготовления известкового молока рабочей концентрации. Из них одна работает, а во второй в это время готовится изве-

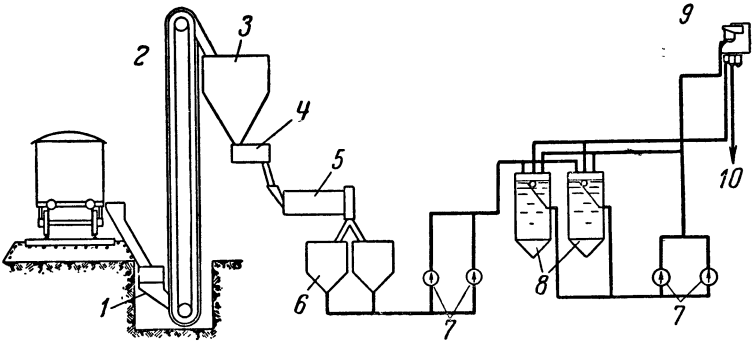


Рис. 9-9. Схема механизированной установки для приготовления известкового молока.

1 — дробилка; *2* — элеватор; *3* — бункер; *4* — питатель; *5* — гасильный вращающийся барабан; *6* —,баки с известковым молоком; *7* — насосы; *8* — гидромешалка; *9* — дозатор известкового молока; *10* — в смеситель.

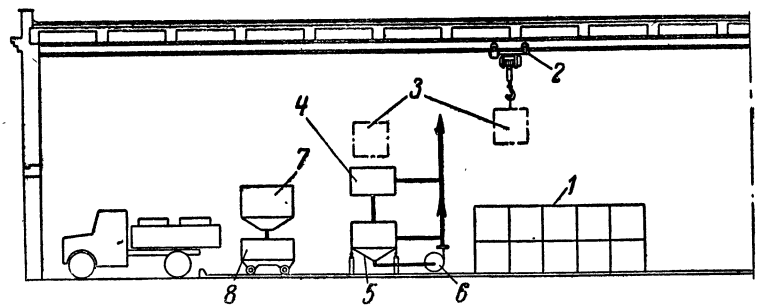


Рис. 9-10. Схема механизированной установки для приготовления известкового молока с доставкой извести в контейнерах.

1 — склад контейнеров с известью; *2* — электротельфер; *3* — контейнер с известью; *4* — гасильный ящик; *5* — гидромешалка; *6* — насос; *7* — бункер; *8* — вагонетка для удаления остатков после гашения извести.

стковое молоко. Перед употреблением оно хорошо перемешивается одним из насосов *6* (второй резервный) при открытой задвижке *б* и закрытой *а*. Затем этим же насосом после соответствующих переключений раствор подается в дозатор *7* в количестве, несколько большем его расхода. Избыток переливается в круговой желоб *8*, откуда стекает снова в мешалку. Подобная непрерывная циркуляция из-

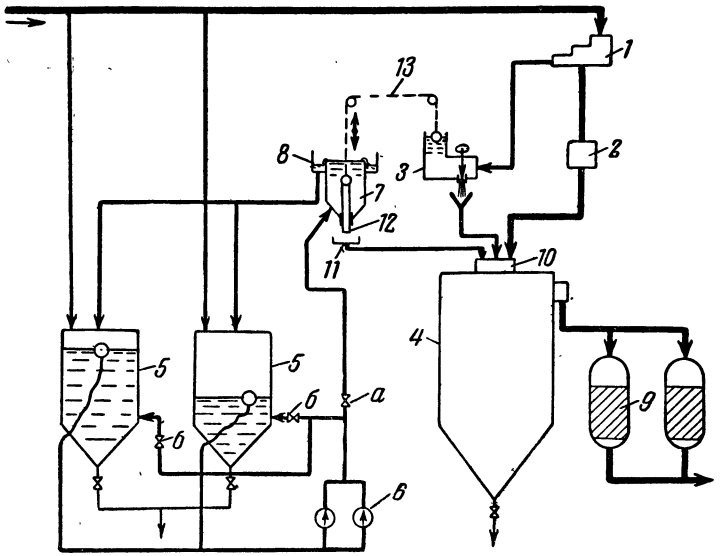


Рис. 9-11. Схема бессатураторной известковой водоподготовительной установки.

весткового молока необходима, чтобы поддержать во взвешенном состоянии все твердые частички. Без этого произойдут расслоение суспензии и выпадение осадка.

Дозатор известкового молока имеет схему, аналогичную рассмотренной в § 8-2 «б». Дозирующая его часть состоит из сосуда *7*, в котором поддерживается постоянный уровень известкового молока, и погруженной в жидкость трубы *12*, подвешенной к тросу *13* и свободно перемещающейся по вертикали в зависимости от изменения в сосуде *3* уровня воды, поступающей в него из распределителя *1*. В трубу встроена пластинка с калиброванным отверстием (шайба). Количество известкового молока, проходящее через отверстие шайбы, пропорционально глубине ее погружения. Можно трубу *12* закрепить неподвижно на доста-

точной глубине, а к тросу *13* подвесить калиброванную иглу. Подъем или опускание иглы будет изменять величину живого сечения отверстия. Этот вариант имеет то преимущество, что устраняет затруднения, связанные с заклиниванием трубы *12* твердыми частичками, проникающими в щель между трубой *12* и сосудом *7*.

9-5. Схемы известковых водоподготовительных установок

На рис. 9-12 представлена схема известковой водоподготовительной установки с сатуратором, а на рис. 9-11 — без сатуратора. Исходная вода подается на водораспределитель *1*. Основной поток ее поступает в подогреватель *2*, откуда с температурой 40—45° С она направляется в отстойник *4*. Второй по величине поток воды направляется в сатуратор *7* (рис. 9-12) или в регулирующее устройство дозатора известкового молока *3* (рис. 9-11). В первом слу-

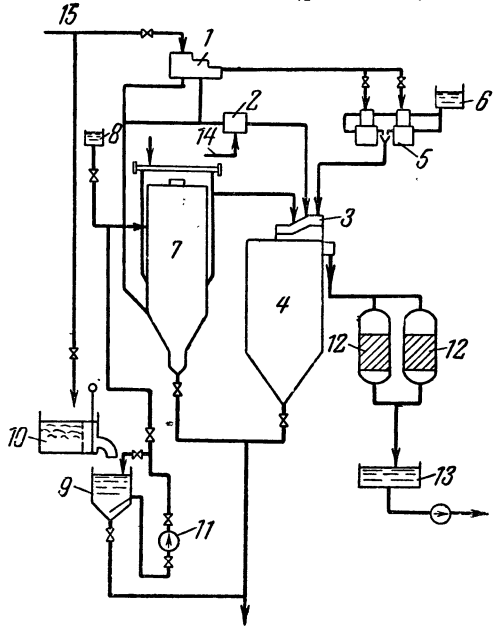


Рис. 9-12. Схема известковой водоподготовительной установки с сатуратором.

1 — распределитель воды; *2* — подогреватель; *3* — смеситель; *4* — отстойник; *5* — дозаторы-вытеснители для раствора коагулятора или соды (в содоизвесткоых установках); *6* — бак для приготовления раствора реагента (коагулятора или соды); *7* — сатуратор; *8* — верхний бак для приготовления известкового молока (резервный); *9* — мешалка для известкового молока; *10* — гасильный ящик; *11* — известковый насос; *12* — осветлительные фильтры; *13* — бак известкованной воды; *14* — подача пара; *15* — подача исходной воды.

чае этот поток воды поступает в отстойник в виде насыщенного известкового раствора. Из отстойников обработанная вода поступает обычно непосредственно на осветлительные фильтры. Эти известковые установки могут быть превращены в содоизвестковые путем установки на них аппаратуры для приготовления раствора соды и дозаторов этого раствора *5* (рис. 9-12). На установках большой производительности, которые являются обычно бессатураторными и имеют много отстойников, вода и реагенты направляются в смеситель, после которого вода распределяется по отстойникам. Установки, изображенные на рис. 9-11 и 9-12, могут быть использованы в качестве коагуляционных (коагуляция в отстойнике), если обрабатываемая вода требует коагуляции. Для этого наряду с $Ca(OH)_2$ в воду вводится и коагулятор, обычно $FeSO_4$.

9-6. Эксплуатация известковых водоподготовительных установок

Известкованная вода, покидающая отстойник, должна быть прозрачной и стабильной. Стабильной называется известкованная вода, не дающая отложений твердых веществ по пути своего движения. Если эти требования в достаточной мере соблюдаются, эксплуатация известковой установки в этом отношении может быть признана удовлетворительной. В противном случае должны быть вскрыты и устранены причины, мешающие получению нужных технических показателей.

Практике известны многие причины, нарушающие нормальную работу отстойника и сатуратора. Одни из них порождаются неудовлетворительным монтажом или несовершенной конструкцией аппаратов, вторые — недосмотром обслуживающего персонала.

Из причин первой группы следует отметить негоризонтальное расположение водоотборных устройств (желобов, воронок, водосливов), нарушение горизонтальности нижней кромки раструба центральной трубы (отстойника, сатуратора), образование неплотностей (отверстий, например, вследствие коррозии) в центральной трубе, наклонную установку центральной трубы и т. п. Во всех этих случаях возникает преимущественно одностороннее движение воды, порождающее местные потоки с большой скоростью, обусловливающие вынос взвеси. Эти недостатки обнаруживаются внимательным осмотром отстойника и сатуратора перед пуском, а также проверкой путем измерения основных размеров и отметок.

Причины, зависящие от обслуживающего персонала, более разнообразны. Прежде всего следует отметить влияние изменения температурного и нагрузочного режимов работы отстойника. Изменение температуры подогрева обрабатываемой воды больше чем на $\pm 1°$ С приводит к увеличению выноса взвеси из отстойника. Поэтому на практике стремятся автоматизировать процесс подогрева воды. Существующие автоматические устройства вполне способны регулировать подогрев воды с точностью $\pm 1°$ С.

Резкие и значительные изменения нагрузки отстойника также ухудшают его работу. Особенно нежелательно резкое снижение нагрузки отстойника, имеющего нижнюю решетку и работающего со слоем шлама. Интенсивное осаждение шлама, получающееся при этом, способствует заносу решетки и нарушению потока воды в отстойнике. Если решетка отсутствует, шлам накапливается на коническом раструбе центральной трубы и, сползая, образует местные сужения кольцевого зазора. В некоторых случаях причиной помутнения воды в отстойнике служит воздух, попавший в него с водой: газовые пузырьки выделяются обычно на частичках взвеси, способствуя их всплыванию.

Повышению стабильности известкованной воды способствуют достаточный подогрев ее, наличие в отстойнике слоя взвешенного шлама и в особенности ввод реагентов в зону шлама. Стабильность известкованной воды можно оценивать величиной разности между общей щелочностью фильтрованной воды на выходе из отстойника $Щ_и$ и после осветлительных фильтров $Щ_{мф}$, т. е.

$$\Delta Щ = Щ_и - Щ_{мф} \quad [мг\text{-}экв/л].$$

Желательно, чтобы величина $\Delta Щ$ была меньше 0,2 *мг-экв/л*.

Глава десятая

ОБРАБОТКА ВОДЫ МЕТОДОМ КАТИОННОГО ОБМЕНА

10-1. Сущность процесса катионирования

а) Общие определения

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

Катион, который катионит отдает в раствор взамен поглощаемых катионов, называется *обменным*. Свойства применяемых в технике катионитов таковы, что в их состав могут быть введены разные обменные катионы. Однако для практики водообработки важными являются только три обменных катиона — 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* (NH_4-*катионирование*).

б) Натрий-катионирование

Процессы, протекающие в слое катионита, при фильтровании через него умягчаемой воды могут быть схематично представлены следующими реакциями в молекулярной форме:

$$\left.\begin{array}{l} Ca(HCO_3)_2 + 2NaR \rightarrow CaR_2 + 2NaHCO_3; \\ Mg(HCO_3)_2 + 2NaR \rightarrow MgR_2 + 2NaHCO_3; \\ CaSO_4 + 2NaR \rightarrow CaR_2 + Na_2SO_4; \\ MgSO_4 + 2NaR \rightarrow MgR_2 + Na_2SO_4; \\ CaCl_2 + 2NaR \rightarrow CaR_2 + 2NaCl; \\ MgCl_2 + 2NaR \rightarrow MgR_2 + 2NaCl. \end{array}\right\} \quad (10\text{-}1)$$

Здесь символом NaR обозначен натрий-катионит, а R—сложный радикал катионита, не подвергающийся растворению в воде и выполняющий роль аниона. Поскольку в водном растворе вещества находятся преимущественно в виде ионов, было бы более правильно процесс катионирования изобразить следующим образом:

$$\left.\begin{array}{l} Ca^{2+} + 2Na^+R^- \rightarrow Ca^{2+}R_2^- + 2Na^+, \\ Mg^{2+} + 2Na^+R^- \rightarrow Mg^{2+}R_2^- + 2Na^+. \end{array}\right\} \quad (10\text{-}1а)$$

Приведенные реакции показывают, что при натрий-катионировании карбонатная жесткость исходной воды переходит в умягченной воде в натриевую щелочность. Иными словами, при натрий-катионировании величина щелочности воды не изменяется, что является основным недостатком этого процесса. Не изменяется также и анионный состав воды: присутствующие в исходной воде анионы SO_4^{2-}, Cl^-

и другие целиком переходят в умягченную воду. Происходит лишь более или менее полная замена катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} катионами натрия, вследствие чего жесткость натрий-катионированной воды снижается до 10—15 *мкг-экв/л* и меньше, а сухой остаток ее несколько возрастает.

После замены всех обменных катионов натрия катионами кальция и магния катионит *истощается,* т. е. теряет способность умягчать воду. В связи с этим можно сказать, что свежий катионит обладает некоторой *емкостью* по отношению к поглощаемым катионам, которая называется *рабочей* (удельной) *емкостью поглощения* и обозначается e_p. Она измеряется количеством грамм-эквивалентов катионов, поглощаемых 1 $м^3$ катионита, т. е. *г-экв/м*^{3}. Следовательно, катионит теряет способность умягчать воду после того, как величина e_p будет полностью исчерпана (израсходована).

Для восстановления первоначальной величины рабочей емкости поглощения необходимо удержанные катионитом катионы удалить из него и заменить обменным катионом натрия. Этот процесс называется *регенерацией* катионита. Он производится фильтрованием раствора NaCl через слой истощенного катионита. Реакции, происходящие при этом, могут быть условно выражены следующими уравнениями:

$$\left.\begin{aligned} CaR_2 + 2n_c\,NaCl \rightarrow 2NaR + CaCl_2 + 2(n_c - 1)\,NaCl;\\ MgR_2 + 2n_c\,NaCl \rightarrow 2NaR + MgCl_2 + 2(n_c - 1)\,NaCl. \end{aligned}\right\} \quad (10\text{-}2)$$

Здесь n_c обозначает количество грамм-эквивалентов NaCl, приходящееся на 1 *г-экв* вытесняемых катионов. Стехиометрически должно быть $n_c = 1$ (58,5 *г/г-экв*). Практически численное значение n_c большей частью лежит в пределах 2,5 — 3,5. Избыток соли необходим для обеспечения наиболее полного вытеснения из катионита поглощенных катионов. Следовательно, на каждый *г-экв* вытесняемых катионов бесполезно теряется $(n_c - 1)$ *г-экв* реагента. Поэтому на практике прибегают к различного рода мероприятиям, которые способствуют экономии соли. Они будут рассмотрены ниже.

в) Водород-катионирование

Протекающие при водород-катионировании процессы могут быть представлены следующими схемами:

$$\left.\begin{array}{l} Ca(HCO_3)_2 + 2HR \rightarrow CaR_2 + 2CO_2 + 2H_2O; \\ Mg(HCO_3)_2 + 2HR \rightarrow MgR_2 + 2CO_2 + 2H_2O; \\ CaSO_4 + 2HR \rightarrow CaR_2 + H_2SO_4; \\ MgSO_4 + 2HR \rightarrow MgR_2 + H_2SO_4; \\ CaCl_2 + 2HR \rightarrow CaR_2 + 2HCl; \\ MgCl_2 + 2HR \rightarrow MgR_2 + 2HCl; \\ NaHCO_3 + HR \rightarrow NaR + 2CO_2 + H_2O; \\ NaCl + HR \rightarrow NaR + HCl; \\ Na_2SO_4 + 2HR \rightarrow 2NaR + H_2SO_4. \end{array}\right\} \quad (10\text{-}3)$$

В ионной форме эти реакции примут более простой вид:

$$\left.\begin{array}{l} Ca^{2+} + 2H^+R^- \rightarrow Ca^{2+}R_2^- + 2H^+; \\ Mg^{2+} + 2H^+R^- \rightarrow Mg^{2+}R_2^- + 2H^+. \end{array}\right\} \quad (10\text{-}3а)$$

Из этих реакций следует, что при водород-катионировании карбонатная жесткость (щелочность) полностью удаляется, вследствие чего происходит снижение сухого остатка исходной воды. Общая (остаточная) жесткость водород-катионированной воды снижается до 10—15 *мкг-экв/л* и ниже. Соли кальция, магния, натрия и других катионов переходят в свободные кислоты. Общая кислотность воды будет при этом равна сумме присутствующих в исходной воде анионов минеральных кислот Cl^-, SO_4^{2-}, NO_3^-. Следовательно, водород-катионированная вода является кислой и непригодной для питания ею паровых котлов или для нужд другого оборудования. На водоподготовительных установках процесс водород-катионирования применяется всегда в сочетании с натрий-катионированием или другими процессами. Достоинством водород-катионирования является то, что оно позволяет снижать щелочность исходной воды до заданного значения при применении его в схемах умягчительных установок.

Регенерация истощенного катионита состоит в фильтровании через слой его 1—1,5%-го раствора серной кислоты (соляная кислота дефицитна и имеет высокую стоимость). При этом катионы водорода вытесняют из него ионы Ca^{2+}

и Mg^{2+}, которые переходят в раствор и удаляются из фильтра. Этот процесс можно описать следующими условными реакциями:

$$\left.\begin{aligned} CaR_2 + n_к H_2SO_4 &\rightarrow 2HR + (n_к - 1)\,H_2SO_4 + CaSO_4; \\ MgR_2 + n_к H_2SO_4 &\rightarrow 2HR + (n_к - 1)\,H_2SO_4 + MgSO_4, \end{aligned}\right\} \quad (10\text{-}4)$$

где $n_к$ — количество *г-экв* серной кислоты, затрачиваемое на 1 *г-экв* вытесняемых катионов Ca^{2+} и Mg^{2+}.

Практически значение $n_к$ лежит в пределах 1,25 — 1,5, т. е. примерно 60 — 75 *г/г-экв* (при стехиометрическом количестве 49 *г/г-экв*).

г) Аммоний-катионирование

Аммоний-катионирование нашло пока ограниченное применение при обработке воды для промышленных котельных. Оно состоит в том, что все катионы, присутствующие в обрабатываемой воде, заменяются катионом аммония NH_4^+, что может быть представлено следующим образом:

$$\left.\begin{aligned} Ca^{2+} + 2NH_4R &\rightarrow CaR_2 + 2NH_4^+; \\ Mg^{2+} + 2NH_4R &\rightarrow MgR_2 + 2NH_4^+; \\ Na^+ + NH_4 &\rightarrow NaR + NH_4^+. \end{aligned}\right\} \quad (10\text{-}5)$$

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

Практическая ценность рассматриваемого процесса основывается на особенностях поведения солей аммония в условиях котловой воды. Основным недостатком процесса водород-катионирования является кислая реакция умягченной воды. Это вызывает необходимость покрывать аппараты, арматуру и трубопроводы кислотостойкими покрытиями с целью устранения кислотной коррозии металла. Этот недостаток устраняется, если его заменить аммоний-катионированием. В этом случае умягченная вода, содержащая соли аммония, не будет обладать кислой реакцией. В условиях же котловой воды (при высокой температуре)

соли аммония распадаются с образованием газообразного аммиака, уходящего с паром, и свободных кислот:

$$\left.\begin{aligned} NH_4Cl &\rightarrow \uparrow NH_3 + HCl; \\ (NH_4)_2SO_4 &\rightarrow 2\uparrow NH_3 + H_2SO_4; \\ NH_4HCO_3 &\rightarrow \uparrow NH_3 + CO_2 + H_2O, \end{aligned}\right\} \quad (10\text{-}6)$$

которые должны нейтрализоваться щелочами, одновременно подаваемыми в котел:

$$\left.\begin{aligned} HCl + NaOH &\rightarrow NaCl + H_2O; \\ H_2SO_4 + Na_2CO_3 &\rightarrow Na_2SO_4 + CO_2 + H_2O. \end{aligned}\right\} \quad (10\text{-}7)$$

Следовательно, аммоний-катионированная вода является потенциально кислой и непригодной для питания ею паровых котлов. Поэтому аммоний-катионирование применяется при умягчении воды в сочетании с натрий-катионированием.

Основным недостатком рассматриваемого процесса является значительное обогащение пара аммиаком, большие концентрации которого в конденсате при одновременном присутствии растворенного кислорода вызывают коррозию медных сплавов.

10-2. Характеристика и свойства катионитов

В настоящее время известно много катионитных материалов, которые могут быть использованы в технике обработки воды. Среди них наиболее широкое применение на водоподготовительных установках электростанций нашли катиониты: сульфоуголь и КУ-2. Остальные марки проходят стадию организации их производства. Сульфоуголь получается путем обработки каменного коксующегося угля дымящей серной кислотой (олеумом). Катионит КУ-2 является синтетическим материалом.

Катиониты характеризуются рядом показателей их качества, из которых основными являются: рабочая емкость поглощения, фракционный состав (размер зерен), насыпной вес и коэффициент набухания. Рабочая емкость катионита e_p является наиболее важным показателем его качества. Величина ее зависит от некоторых свойств катионита и условий его эксплуатации. Для данного материала и для одинаковых условий она увеличивается при работе его в качестве натрий-катионита и снижается при использовании его как водород-катионита.

Объяснение этого явления кроется в природе катионита. Способность материала к ионному обмену обусловливается наличием в его структуре химически активных (функциональных) групп, которые имеют в своем составе водород, способный замещаться другими катионами. Среди них в структуре применяемых на практике катионитов встречаются: сульфогруппа SO_3H, карбоксильная группа COOH, характеризующая класс органических кислот, и фенольная (гидроксильная) группа OH, присутствующая в фенолах и сообщающая им слабые кислотные свойства. Сущность технологии изготовления катионитов и заключается во внедрении в его структуру той или иной функциональной группы или групп. Поэтому структура зерна катионита может быть качественно и условно представлена в виде центрального ядра, составляющего нерастворимую основу катионита, и связанных с ним функциональных групп. Такие группы присутствуют не только на поверхности зерна, но и в глубинных его слоях. При погружении катионита в воду происходит диссоциация его, в результате которой вокруг зерна образуются (для водород-катионита) свободные ионы водорода, т. е. ионная атмосфера. Считается, что активность катионита и его рабочая емкость поглощения зависят от величины ионной атмосферы, возникающей вокруг зерна: они тем выше, чем мощнее ионная атмосфера.

Из упомянутых трех функциональных групп последние две отличаются слабыми кислотными свойствами. Это значит, что в водном растворе они слабо диссоциируют. Если же раствор обладает кислой реакцией, т. е. сравнительно высокой концентрацией катионов водорода, то диссоциация катионитов, содержащих группы COOH и OH, будет в значительной мере подавлена. Ионная атмосфера в этом случае окажется «прижатой» к ядру, что вызовет уменьшение e_p. Этого не произойдет, если умягчаемая вода будет обладать $pH>7$ и вместо водорода в функциональных группах будет стоять натрий, соединения которого обладают большей способностью к диссоциации. Таким образом, подавление диссоциации катионитов («сжатие» их ионной атмосферы) является одной из причин пониженной рабочей емкости поглощения их водородной формы по сравнению с натриевой (при одинаковых условиях).

Вторая причина состоит в том, что при натрий-катионировании в обменных реакциях участвуют не только сульфогруппы, но и другие (COOH, OH), если они имеются в катионите. При водород-катионировании участие принимают главным образом сульфогруппы.

Рабочая емкость поглощения сульфоугля при водород-катионировании зависит главным образом от состава исходной воды. Анионный состав воды, не оказывающий при натрий-катионировании существенного влияния на его рабочую емкость, приобретает при водород-катионировании решающее значение. В этом случае рабочая емкость сульфоугля увеличивается с ростом удельного содержания иона HCO^-_3 в исходной воде, т. е. с ростом отношения эквивалентных количеств $(HCO_3^-) : (HCO_3^-) + (SO_4^{2-}) + (Cl^-) + (NO_3^-)$. Она будет максимальной, когда это отношение будет равно единице, т. е. когда $(SO_4^{2-}) + (Cl^-) + (NO_3^-) = 0$.

Величина рабочей емкости поглощения зависит также от концентрации в умягчаемой воде катионов, одноименных

обменному, которые называются *противоионами*. Увеличение концентрации противоионов обусловливает снижение рабочей емкости. Практически это означает, что исходные воды с высоким (>1 000 *мг/л*) солесодержанием (высокоминерализованные) 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 содержание катиона Na достигнет своего максимума. Увеличение концентрации противоиона (в данном случае натрия) подавляет диссоциацию катионита, что обусловливает сжатие ионной атмосферы и тем самым торможение процесса ионного обмена.

Существенное влияние на величину рабочей емкости катионита оказывает природа поглощаемых катионов. Любой катион может поглощаться катионитом полностью, однако величина рабочей емкости поглощения при этом будет зависеть от природы катиона. В следующем ряду: $Na^+ < NH_4^+ < K^+ < Mg^{2+} < Ca^{2+}$, каждый последующий катион более интенсивно поглощается катионитом, чем предыдущий.

Такая особенность поведения катионитов объясняется следующим. Как было отмечено, вокруг зерен катионита при погружении его в воду возникает ионная атмосфера, напоминающая многослойную оболочку. Наиболее легко замещаются в ней обменные ионы наружного слоя, доступные катионам с минимальной энергией (например, ионам Na^+). Катионы, более интенсивно поглощаемые катионитом, могут заполнять не только наружные, но и внутренние слои ионной атмосферы, за счет чего и возрастает рабочая емкость.

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. Она лучше всего может быть уяснена при помощи рис. 10-1, на котором графически представлен процесс водород-катионирования воды, содержащей катионы Na^+ и Ca^{2+} (для простоты считаем, что магний отсутствует). На оси x отложено количество умягченной воды, а на оси y — концентрация катионов. До точки a происходит полное поглощение всех катионов. В точке a в умягченной воде появляются (начало

проскока) катионы натрия. В точке *б* концентрация Na^+ в умягченной воде становится такой же, как и в исходной, что означает отсутствие поглощения его катионитом. После точки *б* Na^+ начинает вытесняться из катионита катионом Ca^{2+} и концентрация его в фильтрате превышает таковую в исходной воде. Пройдя максимум (точка *в*), концентрация натрия в точке *г* становится равной исходной, т. е. заканчивается процесс вытеснения его из катионита. В точке *д* появляется проскок катионов кальция, увеличивающийся до точки *е*. Такой ступенчатый процесс водород-катионирования на практике приводит к изменению кислотности водород-катионированной воды.

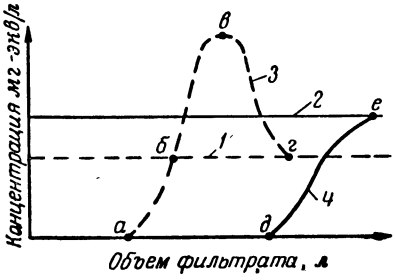


Рис. 10-1. Процесс водород-катионирования раствора, содержащего катионы кальция и натрия.

1 — концентрация Na^+ в исходном растворе; *2* — концентрация Ca^{2+} в исходном растворе; *3* — концентрация Na^+ в фильтрате; *4* — концентрация Ca^{2+} в фильтрате.

Численное значение рабочей емкости и другие данные для некоторых катионитов приведены в табл. 10-1.

Катиониты при погружении их в воду набухают, т. е. увеличиваются в объеме. Степень этого увеличения опре-

Таблица 10-1

Характеристика некоторых технологических качеств разных катионитов

Название катионитов	Размер зерен, *мм*	Характер функциональных групп	Насыпной вес, *т/м³*		Коэффициент набухания	Рабочая емкость $e_р$, *г-экв/м³**	
			сухого	влажного		при Н-катионировании	при Na-катионировании
Сульфоуголь	0,3—1,5	SO_3H $COOH$	0,65	0,55	1,25	286	322
Эспатит-1	0,3—1,5	SO_3H	—	—	—	232	250
Вофатит С	0,3—1,5	$COOH$	0,73	0,55	1,33	143	375
Вофатит К	0,3—1,5	SO_3H OH	0,71	0,48	1,32	393	572

* При катионировании раствора $CaCl_2$ концентрацией 3,57 *мг-экв/л*.

деляется значением коэффициента набухания. В связи с этим следует различать насыпной вес (вес 1 $м^3$ в $т$) катионита в воздушно-сухом и во влажном состояниях. В последнем случае имеется в виду вес 1 $м^3$ влажного катионита после высушивания его до воздушно-сухого состояния.

10-3. Устройство и работа катионитного фильтра

а) Устройство фильтра

Катионирование воды производится в аппаратах, называемых катионитными фильтрами. Катионитный фильтр по устройству во многом сходен с осветлительным. Он состоит (рис. 10-2) из цилиндрического корпуса *1* с приваренными к нему сферическими днищами и рассчитан на внутреннее давление 6 *ати*. Внутри фильтра размещены: воронка *3* для подвода умягчаемой и отвода промывной

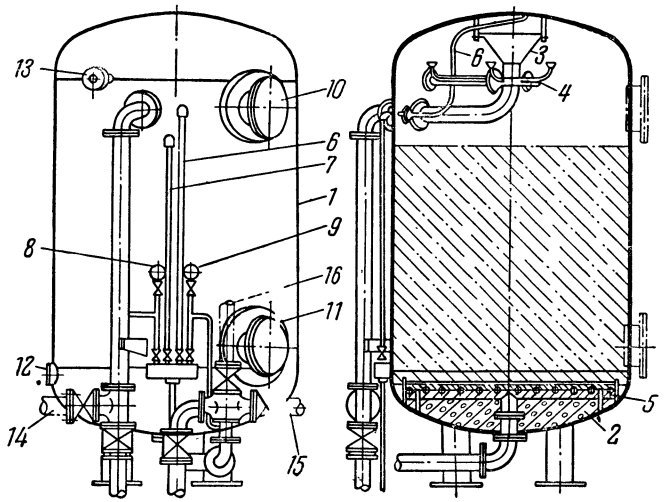


Рис. 10-2. Катионитный фильтр.

воды, устройство *4* для распределения регенерационного раствора реагента по площади фильтра и дренажное устройство *5*. Оно укладывается на плоскости, образуемой бетоном *2*, которым заполняется нижнее днище. В натрий-катионитных фильтрах дренажное устройство выполняется из обычных стальных труб и оснащается фарфоровыми ще-

левыми колпачками. В водород-катионитных фильтрах применяют винипластовые трубы с устройством щелей непосредственно в отводах (бесколпачковый щелевой дренаж). Винипласт может быть заменен трубами из кислотостойкой (легированной) стали. В этом случае возможно устройство и колпачкового дренажа с фарфоровыми колпачками. Пространство фильтра между поверхностью катионита и верхним днищем во время работы заполнено водой и называется водяной подушкой. Оно необходимо для вмещения расширяющегося слоя катионита при взрыхлении его током воды снизу вверх.

Отвод воздуха из фильтра осуществляется трубкой *6*, вторая трубка *7* служит для контроля уровня воды в фильтре при регенерации катионита. Манометры *8* и *9* предназначены для измерения давления до и после фильтра, разность их показаний дает величину потери напора в фильтре. Люк *10* устроен для осмотра фильтра и загрузки его, а *11* — для ревизии и ремонта дренажного устройства. Гидравлическая выгрузка катионита производится через штуцер *12*.

Подвод обрабатываемой воды осуществляется через трубопровод *14*, промывной воды — через трубопровод *16*, а обработанная вода отводится по трубопроводу *15*. Раствор регенерирующего реагента подается в фильтр через штуцер *13* и распределительное устройство *4*. Последнее представляет собой кольцо, от которого идут отводы, раздающие раствор реагента равномерно по площади фильтра. Катионит загружается непосредственно на дренажное устройство, если конструкция его допускает это. В противном случае непосредственно на дренаж засыпается небольшим слоем дробленый антрацит или кварцевый песок с размером зерен, примерно в 2 раза большим, чем размер отверстий или щелей. В каждом последующем слое размер зерен принимается примерно в 2 раза меньше, чем в предыдущем (подстилочный дренаж, § 8-1,а). Подстилочный дренаж обладает рядом недостатков. Подстилочные слои занимают часть полезного объема фильтра и уменьшают тем самым объем загружаемого катионита. Горизонтальность расположения подстилочных слоев часто нарушается. Это обусловливает неравномерную нагрузку площади фильтра из-за неодинакового сопротивления отдельных участков фильтрующего слоя, что ухудшает показатели работы фильтра.

б) Работа фильтра. Умягчение воды

Работа катионитного фильтра состоит из двух периодов: рабочего, когда происходит умягчение воды, и простоя, когда производится регенерация. Умягчение воды заключается в фильтровании ее через слой катионита, загруженного в фильтр, в направлении сверху вниз (прямоток) или снизу вверх (противоток). В первом случае вода поступает

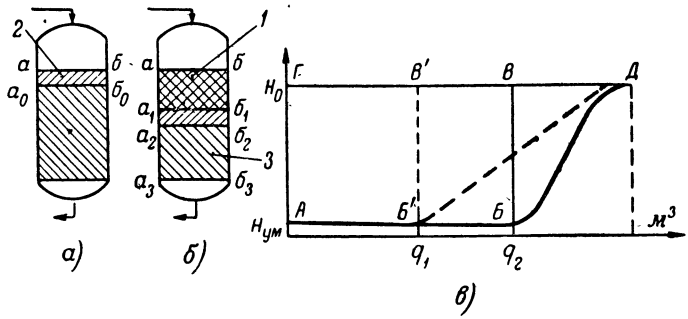


Рис. 10-3. График умягчения воды в катионитном фильтре
1 — истощенный катионит; *2* — зона умягчения; *3* — свежий катионит.

в фильтр через задвижку *1* (рис. 10-4) и выходит из фильтра через задвижку *3*; во втором случае движение воды происходит в обратном порядке.

Процесс умягчения воды в катионитном фильтре удобно представить графически. Для этого (рис. 10-3,*в*) по оси *x* откладывается количество умягченной воды, а по оси *y* — ее жесткость. Точка *Г* соответствует величине жесткости исходной воды. Умягчение определенного объема воды требует известного времени. Начавшись в момент контакта воды со слоем катионита, оно заканчивается на некоторой глубине в плоскости $а_0б_0$ (рис. 10-3,*а*). Слой катионита, в котором начинается и заканчивается умягчение воды, называется *работающим слоем* или *зоной умягчения*. В процессе работы фильтра верхние слои зоны умягчения истощаются и перестают умягчать воду. На смену им вступают в работу свежие слои катионита, расположенные под работающим слоем. Таким образом, зона умягчения постепенно опускается вниз. Спустя некоторое время после работы фильтра, в слое катионита образуются три зоны: умягчения, истощенного и свежего катионита (рис. 10-3,*б*).

При включении фильтра в работу жесткость умягченной воды будет весьма небольшой, изображаемой на гра-

фике точкой *А*. Величина ее остается постоянной до момента совмещения нижних границ зоны умягчения $a_2б_2$ и слоя катионита $a_3б_3$. В момент совмещения (точка *Б*) появляется проскок катионов накипеобразователей и в дальнейшем жесткость умягченной воды начинает возрастать, пока в точке *Д* не станет равной жесткости исходной воды. Это будет означать полное истощение фильтра. Поскольку целью катионирования воды является ее умягчение, то фильтр выводится из работы и останавливается на регенерацию в точке *Б*.

Площадь *АБВГ*, которую обозначим $E_р$, эквивалентна количеству поглощенных фильтром катионов (в частном случае накипеобразователей) и называется рабочей емкостью поглощения фильтра, т. е. всего объема катионита, загруженного в фильтр. Если пренебречь жесткостью умягченной воды, что вполне допустимо в данном случае, то можем написать:

$$E_р = H_o q_1 \ [г\text{-}экв]. \tag{10-8}$$

С другой стороны,

$$E_р = e_р V_{кт} = e_р h_{кт} f_ф \ [г\text{-}экв]. \tag{10-9}$$

Следовательно,

$$E_р = \frac{H_o q_1}{h_{кт} f_ф}, \tag{10-10}$$

где $h_{кт}$ — высота слоя катионита, *м*;
$f_ф$ — площадь катионитного фильтра, $м^2$;
q_1 — количество умягченной воды, $м^3$;
$V_{кт}$ — объем катионита, загруженного в фильтр, $м^3$.

Если скорость фильтрования воды в катионитном фильтре обозначить $v_{кф}$, то

$$q_1 = v_{кф} f_ф T_{кф} = \frac{e_р h_{кт} f_ф}{H_o}, \tag{10-11}$$

откуда время работы катионитного фильтра между двумя последовательными остановками $T_{кф}$, называемое *межрегенерационным периодом*, будет равно:

$$T_{кф} = \frac{e_р h_{кт}}{H_o v_{кф}} \ [ч]. \tag{10-12}$$

Величина $T_{кф}$ должна лежать в пределах 8 — 12 *ч*. Значения $T_{кф} > 12$ *ч* желательны для эксплуатации, но это требует установки дополнительных фильтров, что во многих случаях оказывается экономически нецелесообразным.

Площадь треугольника *БВД* (рис. 10-3,*в*) характеризует емкость поглощения зоны умягчения, которая называется *остаточной* или *хвостовой*. Она минимальна лишь в том частном случае, когда ограничивающие зону умягчения плоскости горизонтальны. На практике по ряду причин зона умягчения может искривляться. Тогда проскок накипеобразователей начнется значительно раньше нормы. На кривой истощения (рис. 10-3,*в*) этому моменту будет соответствовать точка *Б'*. В результате величина используемой емкости поглощения (площадь *АБ'В'Г*) уменьшится за счет возрастания остаточной (*ΔБ'ДВ'*). Поэтому на практике стремятся к максимальному выравниванию нагрузки фильтра по площади сечения. Если снятая с данного фильтра кривая умягчения окажется весьма пологой (как, например, *Б'Д*), это указывает на неудовлетворительную гидродинамическую характеристику фильтра. Лучше всего этот недостаток устраняется ревизией фильтра с выгрузкой материала.

Работа катионитного фильтра продолжается до момента истощения, т. е. до точки *Б*, что определяется по величине жесткости умягченной воды. Истощенный фильтр выводится из работы и подвергается регенерации, имеющей целью восстановление его рабочей емкости.

в) Регенерация катионитного фильтра

Под регенерацией катионитного фильтра понимают комплекс, состоящий из следующих операций: взрыхление, собственно регенерация, отмывка фильтра в дренаж и отмывка фильтра в бак.

Взрыхление является первой технологической операцией и состоит в следующем. Вода из бака *6* (рис. 10-4), установленного на отметке 12—15 *м*, подается в катионитный фильтр через задвижку *2*. Пройдя слой катионита снизу вверх, промывная вода сбрасывается в канализацию через задвижку *5*, которая медленно открывается настолько, чтобы была обеспечена заданная интенсивность взрыхления. Взрыхление предназначено для устранения местных уплотнений в слое катионита, образовавшихся за предыдущий фильтроцикл и нарушающих гидродинамику фильтра,

а также для удаления занесенных водой в катионитовый фильтр загрязнений. Взрыхление обратным током должно привести катионит во взвешенное состояние с тем, чтобы в последующем, предоставив зернам катионита свободно оседать, получить равномерное сопротивление слоя катионита проходу воды. Для этого необходимо разрыхление вести с определенной интенсивностью, которая для сульфоугля лежит в пределах 2,2—3,3 *л/м²·сек* (линейная скорость 8—12 *м/ч*). Величина ее устанавливается и контролируется по расходомеру 7. Длительность операций взрыхления нормально составляет 12—15 *мин*.

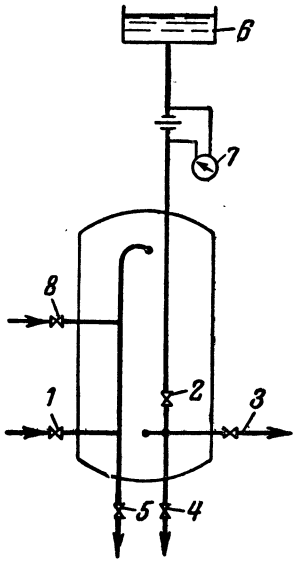


Рис. 10-4. Схема фронта катионитного фильтра.

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 потом фильтруется сверху вниз через слой катионита.

Простота выполнения этой операции не отражает сложности процесса регенерации. Сравнительно полное вытеснение катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} и замена их обменным катионом (H^+ или Na^+) по всему слою катионита достигаются лишь при определенных условиях.

При фильтровании через слой катионита жесткой воды отдельные его участки удерживают неодинаковое количество катионов накипеобразователей. Наиболее полно истощаются верхние участки и в наименьшей степени — нижние. Это объясняется тем, что по ходу воды (сверху вниз) концентрация в ней катионов кальция и магния уменьшается, а обменного иона (H^+ или Na^+) возрастает. Увеличение же концентрации противоиона препятствует поглощению катионов накипеобразователей (противоионный эффект, § 10-2), в результате чего нижние слои катионита истощаются неполностью.

Если нормально истощенный катионит отрегенерировать обычным порядком, т. е. фильтрованием регенерирующего раствора сверху вниз, и затем проверить распределение в нем катионов накипеобразователей, то обнаружится обратная картина: наибольшая концентрация их будет найдена в нижних участках слоя катионита и минимальная — в верхних. Это также результат противоионного эффекта, так как при движении регенерирующего раствора концентрация в нем обменного иона уменьшается, а вытесняемых Ca^{2+} и Mg^{2+} возрастает.

Такое распределение катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} в слое отрегенерированного катионита препятствует глубокому умягчению воды. Для достижения последнего необходимо, чтобы участки катионита, с которыми контактирует умягчаемая вода при выходе из фильтра, были отрегенерированы наиболее полно. Этого можно достигнуть, если регенерирующий раствор фильтровать через катионит в направлении, обратном движению умягчаемой воды. Такой способ регенерации называется *противоточным.*

Регенерация производится открытием задвижек *8* и *4*. Регенерирующий раствор, прошедший фильтр, сбрасывается на первых порах в дренаж. Скорость пропуска его через слой катионита обычно равна для раствора соли 3—4 *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 H_2SO_4. Расход реагента на одну регенерацию катионитного фильтра может быть определен по формуле

$$q_{рг} = \frac{e_p h_{кт} f_ф \gamma_{рг}}{1\,000}\ [кг],$$

где $\gamma_{рг}$ — удельный расход реагента в граммах на 1 *г-экв* рабочей емкости катионита.

При расчетах можно принимать $(NaCl) = 180—200$ *г/г-экв* и $(H_2SO_4) = 70—80$ *г/г-экв*. Величина расхода регенерирующего реагента существенно сказывается на величине емкости поглощения катионита и остаточной жесткости катионированной воды. При желании получить более глубоко умягченную воду прибегают к повышенным удельным расходам реагента.

После подачи в фильтр всего раствора реагента и пропуска его через слой катионита, на что затрачивается порядка 20—30 *мин*, приступают к осуществлению третьей операции — промывке фильтра в дренаж. Для этого задвижку *8* закрывают и открывают задвижку *1*. Отмывку ведут осветленной водой со скоростью 4—5 *м/ч* для соли и 9—10 *м/ч* для кислоты. По истечении некоторого времени (20—25 для натрий-катионитных и 10—12 *мин* для водород-катионитных фильтров) открывают задвижку *2*, закрывают задвижку *4* и отмывку фильтра продолжают в бак, на что затрачивается 20—25 *мин*. Когда качество воды, выходящей из фильтра, будет отвечать установленным нормативам, задвижку *2* закрывают, открывают задвижку *3* и фильтр включают в работу. Общая длительность процесса регенерации катионитного фильтра составляет 1,5—2 *ч*.

10-4. Приготовление рабочего раствора соли и кислоты

Для водоподготовительных установок небольшой производительности регенерирующий раствор соли обычно приготовляется в аппаратах, называемых *солерастворителями.* Общий вид солерастворителя представлен на рис. 10-5. Соль загружается в люк, который закрывают после того, как все количество соли, необходимое для регенерации фильтра, подано в солерастворитель. В некоторых солерастворителях вместо люка загрузочное отверстие закрыто задвижкой. Для осветления раствора соли, которая часто содержит различные загрязнения, в солерастворителе имеется слой дробленого антрацита или кварцевого песка. После загрузки соли в солерастворитель подается осветленная вода, которая выходит из него в виде раствора соли.

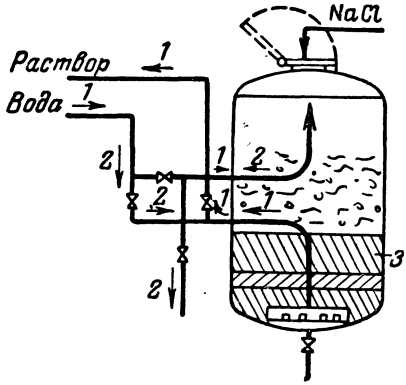


Рис. 10-5. Общий вид солерастворителя.

1 — поток воды при растворении соли; *2* — поток воды при промывке солерастворителя.

Загрузка соли в солерастворитель, по возможности, механизируется.

Для водоподготовительных установок большой производительности такой метод приготовления раствора соли неприемлем. При больших расходах соли на одну регенерацию (800—1 000 *кг* и выше) солерастворители должны обладать большими размерами. Кроме того, наличие их в схеме затрудняет механизацию работ, связанных с приготовлением раствора соли. Выходящий из солерастворителя раствор соли имеет переменную концентрацию: первые порции насыщены, последние — сильно разбавлены, что ухудшает условия регенерации катионита. Из-за этих недостатков солерастворители на крупных установках не применяются.

Взамен их нашло распространение *мокрое хранение соли,* схема которого приведена на рис. 10-6. Соль в большом количестве (до 60 *т*) саморазгружающимся автотранспортом или непосредственно из вагонов загружается в же-

лезобетонные баки-хранилища *1* и заливается водой. Таким образом, в баках всегда имеется в большом количестве насыщенный раствор соли. Он забирается насосами *2*, фильтруется в фильтре *3*, разбавляется в смесителе *4* до необходимой концентрации и подается в регенерируемый фильтр.

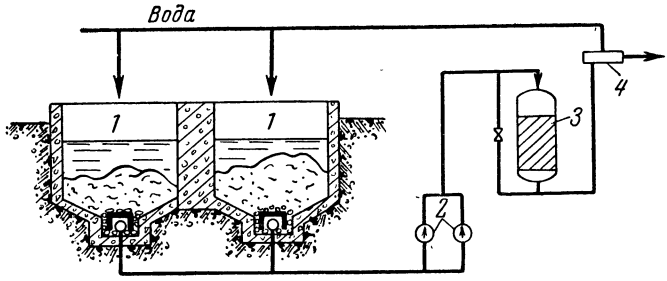


Рис. 10-6. Схема мокрого хранения соли.

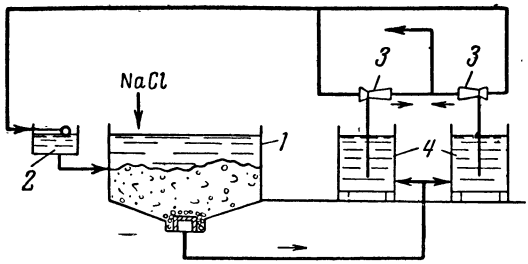


Рис. 10-7. Схема мокрого хранения соли с подачей раствора водяными эжекторами.

На рис. 10-7 представлена схема другого варианта мокрого хранения, не требующего насосов для перекачки раствора соли: насыщенный раствор соли самотеком поступает в мерные бачки *4*, из которых он водяными эжекторами *5* забирается и подается в фильтры. Разбавление раствора до необходимой концентрации происходит в этих же эжекторах. Уровень раствора в баке *1* поддерживается на заданной высоте поплавковым устройством *2*.

Приготовление рабочего раствора кислоты требует полной механизации всех операций, а обращение с кислотой должно предусматривать необходимые меры предосторожности. Один из вариантов решения этой задачи приведен на рис. 10-8. Кислота из железнодорожной цистерны *1*

переливается при помощи сифонной трубы *2* в бак *3*. Зарядка сифона производится путем создания вакуума вакуум-насосом. Бак-приемник *3* должен устанавливаться для этого ниже цистерны. Мерный бачок *5* заполняется также при помощи вакуум-насоса. Из него кислота забирается водяным эжектором *4*, разбавляется в нем до 1—1,5% и подается в регенерируемый фильтр.

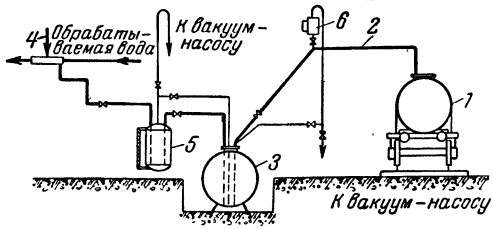


Рис. 10-8. Схема приемки и отмеривания крепкой кислоты и приготовления рабочего раствора ее.

Для предупреждения попадания кислоты в вакуум-насос при зарядке сифона устанавливается промежуточный бачок (емкость) *6*.

10-5. Эксплуатация катионитных установок

Эксплуатация катионитных установок имеет своей задачей получение глубоко умягченной воды при минимально возможном расходе реагентов.

Глубокое умягчение воды надежно достигается в схемах с *барьерными фильтрами,* которые известны также под названием *ступенчатого катионирования.* Сущность этого способа состоит в том, что умягчаемую воду фильтруют последовательно через две группы фильтров. Первые по ходу воды фильтры являются основными и образуют первую ступень катионирования. Катионитные фильтры второй группы называются барьерными, они составляют вторую ступень катионирования. Роль барьерных фильтров сводится к поглощению остатков катионов накипеобразователей, проскочивших основные фильтры, т. е. к доумягчению воды. Для того чтобы они были в состоянии улавливать остатки накипеобразователей, катионит в них должен быть глубоко отрегенерирован. Поэтому барьерные фильтры регенерируются с применением высоких удельных расходов соли (300—400 *г/г-экв*). В целях экономии реагента

отмывные воды барьерных фильтров, содержащие большие количества NaCl, используются для регенерации основных фильтров.

Схемы с барьерными фильтрами отличаются рядом преимуществ. Кроме глубокого умягчения воды, они значительно упрощают контроль работы фильтров и позволяют использовать часть остаточной емкости поглощения. В одноступенчатой схеме катионитные фильтры должны отключаться в точке *Б* (рис. 10-3). Однако практически сделать это довольно трудно, так как точное определение момента, характеризующегося точкой *Б*, трудоемко и кропотливо. Ввиду этого фильтр отключается либо несколько раньше, либо с запозданием. В первом случае ухудшается экономичность работы фильтров, во втором — в котлы поступают накипеобразователи. Если это случается часто, возникает опасность значительного зашламления котлов.

При наличии барьерных фильтров нет надобности точно определять момент отключения фильтров первой ступени. Их отключают обычно с запозданием, чтобы использовать часть остаточной (хвостовой) емкости поглощения. Это дает экономию соли. Водород-катионитные барьерные фильтры применяют только в обессоливающих установках.

В качестве барьерных иногда применяют противоточные катионитные фильтры, разработанные МО ЦКТИ (инж. Гурвич С. М.). В них фильтрование воды происходит снизу вверх, а движение регенерирующего раствора — сверху вниз. Поэтому умягчаемая вода на выходе из фильтра контактирует с глубоко отрегенерированным катионитом, что обеспечивает глубокое умягчение воды. Противоточный фильтр почти полностью заполняется катионитом. Взамен верхней распределительной воронки устанавливается колпачковое устройство. При фильтровании воды снизу вверх катионит не всплывает, будучи зажат слоем воды. Раствор соли подается через распределительное устройство. Регенерация такого фильтра производится без взрыхления, поэтому поступающая в него вода должна быть хорошо осветлена, чтобы исключить загрязнение слоя катионита.

Одна из причин ухудшения работы катионитных фильтров связана с неудовлетворительным протеканием процесса коагуляции воды на осветлительных фильтрах. Она состоит в том, что при неполном гидролизе алюминиевого коагулятора становится возможным выделение на зернах катионита гидроокиси алюминия, обволакивающей их и изолирующей от воды. В этом случае заметно снижается емкость поглощения катионита и, следовательно, производительность установки. Возникает также перерасход реагента (соли). К аналогичным результатам приводит отложение на зернах катионита карбоната кальция, наблюдаю-

щееся на известково-катионитных установках с нестабильной известкованной водой. Образовавшиеся в слое катионита отложения удаляются промывкой его раствором кислоты.

Наряду с указанными затруднениями, которые зависят от эксплуатации, имеет место и следующее явление, обусловливающее перерасход соли на регенерацию фильтров. Образующаяся в процессе коагуляции CO_2 понижает pH воды, т. е. увеличивает концентрацию ионов водорода. Последние, обладая способностью к катионному обмену, вступают в реакцию с натрий-катионитом, отвлекая на себя часть емкости поглощения, уменьшая e_p по Ca^{2+} и Mg^{2+}.

Снижение емкости поглощения катионита может происходить и по другим причинам. Среди них следует отметить неравномерную фильтрацию воды по площади фильтра из-за образования на поверхности катионита корки загрязнений, наличие в его слое местных уплотнений (комков), что ухудшает гидродинамическую характеристику слоя. Наличие в умягчаемой воде аммиака также снижает емкость поглощения катионита по накипеобразователям, поскольку ионы NH_4^+ поглощаются катионитом.

В условиях эксплуатации катионитные (равно как и осветлительные) фильтры проходят ревизию, которая часто связана с выгрузкой фильтрующего материала и осмотром дренажного устройства. Выгрузка и обратная загрузка материала являются трудоемкими операциями, механизация которых основана на применении принципа гидроперегрузки, т. е. использования воды в качестве транспортирующего средства, для чего в современных напорных фильтрах предусматривается в нижней части корпуса люк для подсоединения гибкого шланга.

Глава одиннадцатая

СХЕМЫ КАТИОНИТНЫХ ВОДОПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК

11-1. Натрий-катионитные установки

Обработка воды требует применения многих технологических процессов, которые в предыдущих главах рассматривались каждый в отдельности. 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, выработанных практикой и представляющих собой определенные сочетания технологических процессов. Наименование этих схем обычно составляется из входящих в них технологических процессов с сохранением их последовательности.

Наиболее простой и дешевой является установка, выполненная по схеме непосредственного натрий-катионирования. Оборудование ее состоит из одних катионитных фильтров и солерастворителя или установки мокрого хранения соли. Однако эта схема может быть использована лишь при наличии некоторых условий. Одно из них заключается в том, что обрабатываемая вода не должна содержать грубодисперсных и коллоидных примесей. Этому требованию удовлетворяет большинство артезианских вод, а также вода из сети питьевого водоснабжения. Второе условие связано с величиной щелочности умягчаемой воды $Щ_{св}$. Поскольку при натрий-катионировании величина щелочности исходной воды не изменяется, применение рассматриваемой схемы будет возможно, если $Щ_{св}$ будет удовлетворять следующей зависимости:

$$Щ_{св} \leqslant \frac{p_п}{p_п + 100} \cdot \frac{Щ_{кв}}{\alpha_x} 100 \, [мг/экв/л], \qquad (11\text{-}1)$$

которая предохраняет котлы от чрезмерных продувок по щелочности. Для того чтобы относительная щелочность котловой воды не превышала 20%, сухой остаток обрабатываемой воды должен удовлетворять неравенству

$$S_{св} \geqslant 200 Щ_{св} \, [мг/л]. \qquad (11\text{-}2)$$

Если оно не соблюдается, то при использовании чисто катионитных схем (т. е. без снижения щелочности исходной воды) необходимо обрабатывать котловую воду нитратами (§ 5-4).

Если исходная вода загрязнена грубодисперсными и коллоидными примесями, применяется схема: коагуляция — фильтрование — натрий-катионирование, изображенная на рис. 11-1. Обрабатываемая вода под напором насосов *1* подается на осветлительные фильтры *2*. Перед ними при помощи шайбовых (или другого типа) дозаторов *3* и *4*

в трубопровод вводится раствор коагулятора и щелочи, образующиеся осадки гидроокисей, скоагулированный коллоид и грубодисперсные примеси задерживаются осветлительными фильтрами *2*. Осветленная вода поступает на натрий-катионитные фильтры *5*. Эта схема позволяет успешно обрабатывать воды большинства поверхностных источников. Однако область ее применения определяется последними двумя условиями, рассмотренными выше (величины $Щ_{св}$ и $S_{св}$).

Как показывает опыт, содержание коллоидных примесей в воде многих поверхностных источников водоснабжения

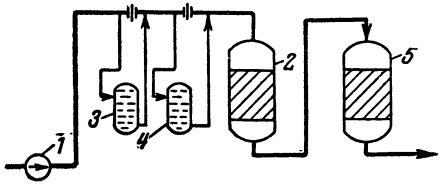


Рис. 11-1. Схема установки: коагуляция — фильтрование — натрий-катионирование.

составляет бо́льшую часть года (8—10 мес.) незначительную величину. Поэтому коагуляционные установки в этих случаях работают 2—4 мес. в году. Имеются, однако, воды, требующие непрерывной круглогодичной коагуляции.

Рассмотренные выше схемы называют еще прямоточными, так как в них нет разрыва потока воды, подаваемой одной группой насосов через всю цепочку аппаратов. Основной недостаток прямоточных натрий-катионитных установок состоит в том, что они не способны изменять щелочность исходной воды и, следовательно, выдают воду со щелочностью, равной по величине щелочности обрабатываемой воды. Помимо высоких продувок котлов, это обусловливает загрязнение пароконденсатных потоков углекислотой, вызывающей коррозию конденсатопроводов. Поэтому во всех случаях применения этих схем необходимо принимать во внимание возможность углекислотной коррозии оборудования и трубопроводов.

Следующей является схема: известкование (с коагуляцией или без нее) — фильтрование — натрий-катионирование (рис. 11-2). Она носит название комбинированной и отличается от предыдущих схем тем, что позволяет снижать щелочность обрабатываемой воды. Исходная вода подается насосами на водораспределитель *1*, подогрева-

тель *8* и далее проходит обычный процесс известкования на известковой предочистке, подробно рассмотренной в § 9-1 и 9-5. По выходе из отстойника *2* вода самотеком поступает на осветлительные фильтры *3* и затем в промежуточный бак *4* известкованной воды (разрыв струи). Второй группой насосов *5* известкованная осветленная вода подается на натрий-катионитные фильтры *6* и барьерные

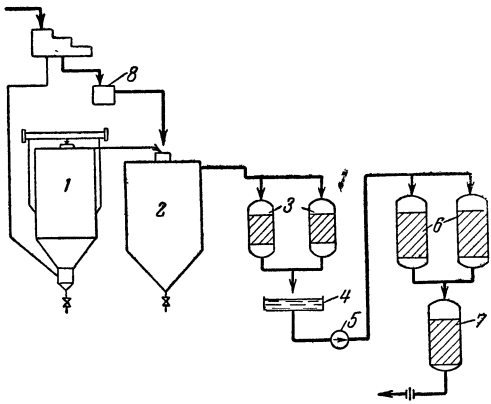


Рис 11-2. Схема известково-катионитной установки.

натрий-катионитные фильтры *7*. Известково-катионитные установки отличаются от прямоточных громоздкостью, придаваемой им известковой частью, и большими капиталовложениями. Однако они наиболее универсальны, так как позволяют обрабатывать воду практически любого состава. Эти установки используют также в случаях обескремнивания воды методом осаждения.

11-2. Водород-натрий-катионитные установки

Применяются схемы параллельного, последовательного и совместного водород-натрий-катионирования. Все они позволяют снижать щелочность умягчаемой воды, хотя и в неодинаковой степени.

Схема параллельного водород-натрий-катионирования представлена на рис. 11-3. Обрабатываемая вода, пройдя осветлительные фильтры *1*, направляется двумя параллельными потоками на водородные *2* и натриевые *3* катионитные фильтры. Если необходимо получить умягченную воду

с избыточной щелочностью $\Delta Щ$ [*мг-экв/л*], то доля воды, направляемой на водородные ($X_{Н}$) и натриевые (X_{Na}) фильтры, будет определяться выражениями:

$$\left.\begin{aligned} X_{Н} &= \frac{H_к - \Delta Щ}{H_о} 100\ [\%] \\ \text{и} \\ X_{Na} &= \frac{H_{нк} + \Delta Щ}{H_о} 100\ [\%]. \end{aligned}\right\} \qquad (11\text{-}3)$$

Пройдя фильтры, кислая водород-катионированная вода смешивается со щелочной натрий-катионированной с целью

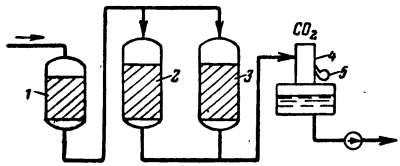


Рис. 11-3. Схема параллельного водород-натрий-катионирования.

вейтрализации свободных кислот, которая состоит в связывании ионов водорода бикарбонатным ионом:

$$HCO_3^- + H^+ \rightarrow \uparrow CO_2 + H_2O.$$

Для удаления образующейся свободной углекислоты вода после фильтров направляется в дегазатор (десорбер, декарбонизатор) *4*. Он содержит внутри специальную насадку, состоящую из керамических колец или деревянных досок. Насадка предназначена для разделения воды на тонкие пленки, стекающие по поверхности ее элементов (колец, досок). Навстречу движению воды вентилятором *5* подается воздух, который и удаляет из нее углекислоту (процесс десорбции, § 6-3), воздух подается в количестве 30—40 *м*^{3} на 1 *м*^{3} обрабатываемой воды. Остаточное содержание CO_2 в воде после десорбера зависит от температуры ее и при указанном расходе воздуха находится в пределах $2 \div 6$ *мг/л*.

Схема параллельного водород-натрий-катионирования обычно применяется для слабоминерализованных ($H_к : H_0 > 0{,}5$) вод. Она позволяет получать умягченную воду с минимальной щелочностью (0,5—0,6 *мг-экв/л*). Для

сильно минерализованных вод ($S_{св} > 1000$ *мг/л*, $H_к : H_0 < 0{,}5$) более целесообразна схема последовательного водород-натрий-катионирования, представленная на рис. 11-4. После осветлительных фильтров *1* осветленная вода поступает на водород-катионитные фильтры *2*. Кислая вода нейтрализуется щелочностью исходной, смешиваясь с ней в точке *A*, после чего смесь поступает в декарбонизатор *4*. Дега-

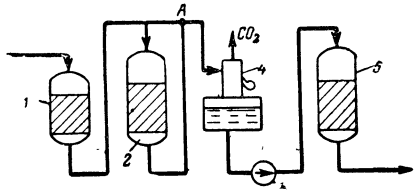


Рис. 11-4. Схема последовательного водород-натрий-катионирования.

зированная вода второй группой насосов *3* направляется в натрий-катионитные фильтры *5* для окончательного умягчения.

Принципиальное отличие этой схемы от предыдущей состоит в следующем. При умягчении по схеме параллельного водород-натрий-катионирования вод с высокой некарбонатной жесткостью кислотность водород-катионированной воды нарастает по мере движения ее в слое катионита сверху вниз. Увеличение кислотности воды, т. е. концентрация ионов H^+ в ней, тормозит процесс поглощения катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} (противоионный эффект § 10-2), вследствие чего водород-катионированная вода покидает водородные фильтры недостаточно умягченной. При последовательном водород-натрий-катионировании этот недостаток несуществен, так как жесткость умягченной воды определяют натрий-катионитные фильтры.

Совместное водород-натрий-катионирование состоит в том, что катионит регенерируют вначале определенным количеством кислоты, а затем после ее отмывания — определенным количеством соли. В результате катионит оказывается заряженным ионами H^+ и Na^+. При фильтровании умягчаемой воды в слое катионита будут протекать процессы водород-натрий-катионирования.

В рассматриваемых схемах водород-натрий-катионирования, особенно в первых двух, водород-катионитные фильтры, арматура, трубопроводы водород-катионированной воды должны предохраняться от кислотной коррозии. Обычно это достигается нанесением внутреннего кислотостойкого покрытия, изолирующего металл от кислой среды,

в качестве которого применяют специальные лаки или резину (гуммирование). Необходимость в таких покрытиях является недостатком рассматриваемых схем. Отмывная вода водород-катионитных фильтров, сбрасываемая в дренаж, является кислой. Чтобы предупредить разрушение канализационной сети трубопроводов, ее нейтрилизуют в специальных устройствах, что усложняет эксплуатацию таких установок.

Приведенные недостатки в значительной мере устраняются в способе *щелочного водород-катионирования,* известного также под названием способа *«голодной» регенерации.* Сущность его заключается в том, что водород-катионитные фильтры в схеме последовательного водород-натрий-катионирования регенерируются *недостаточным* количеством кислоты. В основе этого лежат следующие соображения. В обычном случае водород-катионированная вода обладает кислотностью, потому что водородный фильтр заряжается большим количеством обменных катионов водорода, вполне достаточным для замены всех катионов, присутствующих в обрабатываемой воде. Для снижения щелочности последней такая замена всех катионов совсем необязательна. Для этого вполне достаточно заменить количество их, эквивалентное щелочности умягчаемой воды $Щ_{св}$, за вычетом заданной остаточной щелочности $Щ_{ц}$, т. е. величине $Щ_{св} - Щ_{ц}$. В этом случае водород-катионированная вода, выходящая из фильтра, будет щелочной (отсюда — щелочное водород-катионирование), с величиной щелочности, равной в среднем $Щ_{ц}$.

Такой режим практически достигается тем, что водородные фильтры регенерируются количеством кислоты, эквивалентным разности $Щ_{св} - Щ_{ц}$ (а не общей жесткости, как обычно) при удельном расходе, равном 49 *г/г-экв,* т. е.

$$g_{кс} = \frac{q_{фв}(Щ_{св} - Щ_{ц})\,49}{1\,000}\ [кг], \qquad (11\text{-}4)$$

где $q_{фв}$ — количество обрабатываемой воды за один рабочий цикл.

В этом случае в слое катионита из всех возможных процессов (например, образования сильных кислот HCl и H_2SO_4) результирующим будет процесс разрушения щелочного иона HCO_3^-:

$$HCO_3^- + H^+ \rightarrow CO_2 + H_2O,$$

поскольку он сопровождается образованием малодиссоциирующего соединения—воды (§ 1-5). Способ щелочного водород-катионирования позволяет значительно снизить расход кислоты на регенерацию.

Глава двенадцатая

ОБЕССОЛИВАНИЕ И ОБЕСКРЕМНИВАНИЕ ВОДЫ

12-1. Обескремнивание воды

Обескремнивание воды является радикальной мерой борьбы с заносом проточной части паровых турбин установок высокого и сверхвысокого давления. Кремниевая кислота, присутствующая в исходной воде, не поддается достаточно глубокому удалению способами обработки воды, рассмотренными в предыдущих главах. В процессе коагуляции и известкования воды происходит частичное (≈50—60%) удаление ее, что является недостаточным.

Существует несколько способов обескремнивания воды. В отечественной практике наиболее широкое применение нашло обескремнивание воды магнезиальным способом, заключающимся в обработке воды в отстойниках одновременно CaO и MgO. Известь при этом выполняет свои обычные функции, окись же магния является собственно обескремнивающим реагентом. Обескремнивание в этих способах основывается на свойстве окиси и гидрата окиси магния активно адсорбировать на своей поверхности кремниевую кислоту с последующим образованием труднорастворимого силиката магния. Таким бразом, активную роль выполняет не только добавляемая в воду окись магния, но и гидрат окиси магния, образующийся в результате известкования воды. Результаты обескремнивания воды зависят от многих условий и в том числе от вида реагента, температуры подогрева обрабатываемой воды, дозы окиси магния и продолжительности контакта воды со взвешенным в отстойнике шламом. Они наиболее приемлемы при проведении обескремнивания одновременно с известкованием и коагуляцией.

Каустический магнезит, применяемый в качестве обескремнивающего реагента, представляет собой порошок с содержанием MgO в пределах 75—88%, получаемый при обжиге минерала магнезита ($MgCO_3$). Помимо магнезита, применяют для обескремнивания воды доломит, являющийся двойной углекислой солью кальция и магния

$CaMg(CO_3)_2$. При обжиге доломита углекислые соединения разлагаются с образованием окисей кальция и магния. Содержание последних в обожженном продукте для доломитов разных месторождений различно: величина отношения $CaO : MgO$ изменяется в пределах 1,2—1,5, повышаясь в отдельных случаях до 2. Количество окиси магния, добавляемое в обрабатываемую воду, составляет в среднем 14—16 *мг* на каждый миллиграмм присутствующей в ней кремнекислоты. Оба рассматриваемых реагента позволяют получить обработанную воду с остаточным содержанием кремнекислоты в пределах 0,8—1 *мг/л*.

Магнезиальному способу, однако, свойственны многие недостатки. Он требует громоздкой аппаратуры (отстойников), сложного реагентного хозяйства, тщательного ведения режима работы отстойников, точной регулировки температуры подогрева воды и т. п. Вместе с тем получаемая глубина обескремнивания в ряде случаев явно недостаточна. Этих недостатков лишен новый способ обескремнивания, состоящий в том, что обрабатываемая вода фильтруется через слой магнезиального сорбента, загружаемого в осветлительные фильтры. Сорбент изготовляется из магнезитового порошка путем обработки его соляной кислотой и последующего дробления затвердевшей массы. Как показывает первый промышленный опыт, этот способ является весьма перспективным. Остаточное содержание кремнекислоты в обработанной воде составляет порядка 0,5—0,6 *мг/л*.

Такая степень обескремнивания воды является приемлемой только для котлов высокого давления в условиях небольших добавок химически обработанной воды в питательную систему котлов. Для котлов сверхвысоких и тем более критических параметров требуются другие способы обескремнивания, способные удалять кремниевую кислоту более глубоко. Одним из таких способов является *анионирование* воды с применением сильноосновных анионитов.

12-2. Обессоливание воды методом ионного обмена

а) Анионирование воды

Анионированием называется процесс обмена анионов между растворенными в воде кислотами и твердым веществом, погруженным в эту воду и называемым анионитом. В качестве обменных анионов, которыми заряжается анионит, используются OH^-, CO_3^{2-} и HCO_3^-.

Аниониты способны достаточно полно и интенсивно поглощать из фильтруемой воды различные анионы лишь в том случае, когда они присутствуют в ней в виде соответствующих кислот.

Это объясняется следующим. При фильтровании через анионит водных растворов нейтральных солей в воде образуются противоионы (§ 10-2, 10-3):

$$RaOH + NaCl \rightleftarrows RaCl + Na^+ + OH^-. \qquad (12\text{-}1)$$

Здесь символом RaOH обозначен анионит с обменным ионом OH^- а Ra — сложный радикал анионита, не подвергающийся растворению в воде и играющий роль катиона.

Появление противоионов, а затем и повышение их концентрации *подавляют* диссоциацию анионита, что ведет к потере им способности к ионному обмену. Если же в водном растворе присутствуют кислоты, противоионы связываются ионами водорода в слабодиссоциированные соединения.

Поэтому для достижения глубокого обессоливания воды необходимо предварительно перевести все соли, содержащиеся в воде, в соответствующие кислоты. Практически это означает, что обрабатываемую воду вначале необходимо фильтровать через водород-катионит, а затем — через анионит.

При фильтровании через анионит кислой водород-катионированной воды происходит замена анионов кислот обменным анионом, что можно представить следующими условными реакциями:

$$\left.\begin{aligned} 2RaOH + H_2SO_4 &\rightarrow (Ra)_2SO_4 + 2H_2O;\\ RaOH + HCl &\rightarrow RaCl + H_2O;\\ RaOH + H_2SiO_3 &\rightarrow RaHSiO_3 + H_2O, \end{aligned}\right\} \qquad (12\text{-}2)$$

или при другом обменном анионе

$$\left.\begin{aligned} (Ra)_2CO_3 + H_2SO_4 &\rightarrow (Ra)_2SO_4 + CO_2 + H_2O;\\ (Ra)_2CO_3 + 2HCl &\rightarrow 2RaCl + CO_2 + H_2O. \end{aligned}\right\} \qquad (12\text{-}3)$$

Аналогичный результат будет получен и при наличии в анионите обменного аниона HCO_3^-. Таким образом, результирующими продуктами реакции анионирования, остающимися в воде, являются вода и углекислота, которая в последующем удаляется. Наличие в анионите необходимых обменных анионов достигается регенерацией его раствором соответствующей щелочи: NaOH, Na_2CO_3, $NaHCO_3$.

б) Характеристика и свойства анионитов

Аниониты представляют собой искусственно приготовленные материалы. Они обладают способностью поглощать из водных растворов анионы как минеральных, так и органических кислот. Аниониты делятся на две группы: *слабоосновные* и *сильноосновные*.

Слабоосновные аниониты способны к поглощению анионов только сильных кислот (SO_4^{2-}, Cl^-, NO_3^- и др.), анионы слабых кислот (HCO_3^-, $HSiO_3^-$ и др.) ими не удерживаются. Сильноосновные аниониты могут извлекать из водных растворов все анионы, т. е. и сильных и слабых кислот. Однако они обычно обладают более высокой стоимостью в сравнении со слабоосновными. Поэтому эти аниониты применяют пока главным образом для поглощения кремниевой кислоты в установках полного обессоливания. Извлечение анионов сильных кислот производится при помощи слабоосновных анионитов. Таким образом, при полном обессоливании воды применяют обе группы анионитов.

Сильноосновные аниониты в отличие от слабоосновных способны к обмену анионов и в нейтральной среде. Практически это означает, что если через слой сильноосновного анионита фильтровать раствор NaCl, то будет протекать ионный обмен (невозможный для слабоосновных анионитов) по реакции

$$RaOH + NaCl \rightarrow RaCl + NaOH. \qquad (12\text{-}4)$$

Поэтому основность анионита можно условно выражать количеством ионов хлора, поглощаемых 1 $м^3$ анионита при фильтровании в определенных условиях раствора NaCl заданной концентрации до момента проскока в фильтрат иона хлора. Это количество называется «основным числом» (*Оч*) и выражается в *г-экв/м*^{3}.

Способность сильноосновных анионитов с большим *Оч* переходить в хлоридную форму при фильтровании через них раствора поваренной соли нашла практическое применение на ряде зарубежных (США) водоподготовительных установок для снижения щелочности натрий-катионированной воды. Для этого обрабатываемую воду предварительно умягчают на натрий-катионитовых фильтрах, после чего направляют в анионитовые фильтры, предварительно отрегенерированные раствором NaCl. В них происходят поглощение щелочных ионов HCO_3^- (наряду с SO_4^{2-}) и замена их ионами Cl^-:

$$\left.\begin{aligned} RaCl + NaHCO_3 &\rightarrow RaHCO_3 + NaCl; \\ 2RaCl + Na_2SO_4 &\rightarrow Ra_2SO_4 + 2NaCl, \end{aligned}\right\} \qquad (12\text{-}5)$$

что и обусловливает снижение щелочности. При регенерации эти реакции протекают справа налево. Такой метод снижения щелочности катионированной воды обладает некоторыми преимуществами по сравнению с методом водород-натрий-катионирования. Например, исключается употребление кислоты для регенерации фильтров, а следовательно,

и необходимость противокислотных покрытий трубопроводов и аппаратуры, становятся ненужными декарбонизаторы. Для небольших водоподготовительных установок рассматриваемый метод снижения щелочности катионированной воды является весьма перспективным.

Аниониты подобно катионитам характеризуются неодинаковой способностью к поглощению различных анионов. Для большинства анионитов справедливым является соотношение

$$SO_4^{2-} > Cl^- > NO_3^-, \qquad (12\text{-}6)$$

показывающее, что каждый предыдущий анион поглощается более активно и в большем количестве, чем последующий. Так, например, для многих анионитов отношение рабочей емкости поглощения по сульфатному иону e_p' к емкости по иону хлора e_p'' лежит в пределах $e_p' : e_p'' = 1{,}4 - 1{,}5$.

Важной характеристикой качества сильноосновных анионитов является их кремнеемкость. Под рабочей кремнеемкостью анионита понимается количество SiO_3^{2-}, выраженное в грамм-эквивалентах, которое поглощается 1 $м^3$ анионита (влажного) до момента проскока не более 0,1 $мг/л$ SiO_3^{2-} в фильтрат. Кремнеемкость анионита зависит от концентрации SiO_3^{2-} в исходной воде и от степени его истощения (при прочих равных условиях). При концентрации SiO_3^{2-} в исходной воде в пределах 5 — 15 $мг/л$ кремнеемкость анионита ЭДЭ-10П составляет 20—25 $г\text{-}экв/м^3$ при остаточной концентрации в фильтрате SiO_3^{2-} 0,1 $мг/л$ и 30 — 45 $г\text{-}экв/м^3$ при остаточном содержании SiO_3^{2-} 0,5 $мг/л$. Как показывает опыт эксплуатации первых промышленных отечественных установок, при помощи сильноосновных анионитов возможно снизить содержание кремнекислоты в обессоленной воде до 20—30 $мкг/кг$. В табл. 12-1 приведены данные, характеризующие качество некоторых марок анионитов, из которых промышленное применение нашли АН-2Ф и ЭДЭ-10П.

Некоторые марки анионитов обнаруживают склонность к окислению растворенным в воде кислородом, вследствие чего происходит изменение их технологических качеств. О таких анионитах говорят, что они «стареют» или склонны к «старению». В стареющих анионитах емкость поглощения с течением времени уменьшается, становятся более заметными, т. е. усиливаются, их амфотерные свойства.

Таблица 12-1

Характеристика некоторых технологических качеств разных анионитов

Наименование анионита	Основность	Насыпной вес, *т/м*³		Коэффициент набухания	Рабочая кислотоемкость по 1,78 *мг-экв/л*	
		сухого	влажного		HCl, *г-экв/м*³	H_2SO_4, *г-экв/м*³
Эспатит ТМ	Слабоосновный	0,80	0,70	1,15	114	525
АН-2Ф	То же	0,60	0,40	1,50	450÷550	675÷825
ЭДЭ-10П	Сильноосновный	0,63	0,40	1,57	790	1 200
ПЭ-9		0,65	0,40	1,62	1 000	1 440
Вофатит МД (Германия)	Слабоосновный	0,70	0,62	1,13	392	535
Амберлит 1-R-4 (США)	То же	0,57	0,40	1,42	1 140	1 780

Сущность амфотерности анионитов сводится к следующему. В нормальном случае анионит должен поглощать из воды только анионы кислот и совершенно не удерживать катионы. Это значит, что анионит не должен содержать функциональных групп (см. § 10-2, петит), способных к катионному обмену. В действительности такие группы могут быть и при старении материала, число их в анионите заметно возрастает. В таком случае анионит приобретает способность поглощать наряду с анионами кислот и катионы водорода, т. е. становится амфотерным, что условно можно показать следующей схемой:

$$Ra\begin{matrix}H\\Cl\end{matrix}, \text{ или } Ra\begin{matrix}H\\(SO_4^{2-})\end{matrix} \qquad (12\text{-}7)$$

изображающей истощенный анионит. При регенерации его NaOH происходит обмен ионов по схеме

$$Ra\begin{matrix}H\\Cl\end{matrix} + 2NaOH \rightarrow R\begin{matrix}Na\\OH\end{matrix} + NaCl + H_2O. \qquad (12\text{-}8)$$

При последующем фильтровании через такой отрегенерированный анионит водород-катионированной водой натрий вытесняется водородом, что приводит к обогащению фильтрата солями:

$$Ra\begin{matrix}Na\\OH\end{matrix} + 2HCl \rightarrow Ra\begin{matrix}H\\Cl\end{matrix} + NaCl + H_2O. \qquad (12\text{-}9)$$

Если количество функциональных катионитовых групп в анионите значительно, полного обессоливания воды или конденсата при помощи такого анионита достичь затруднительно.

Сильноосновные аниониты поглощают также и органические вещества, присутствующие в обрабатываемой воде, что снижает их обменную способность и усиливает амфотерные свойства. Поэтому обессоливаемая вода должна тщательно освобождаться от органических загрязнений перед поступлением ее в анионитные фильтры. В особых случаях это может быть достигнуто пропусканием воды через фильтры, загруженные активированным углем.

в) Схемы обессоливающих установок

Схемы обессоливающих водоподготовительных установок могут быть различными. Они определяются требованиями к качеству обессоленной воды, качеством исходной

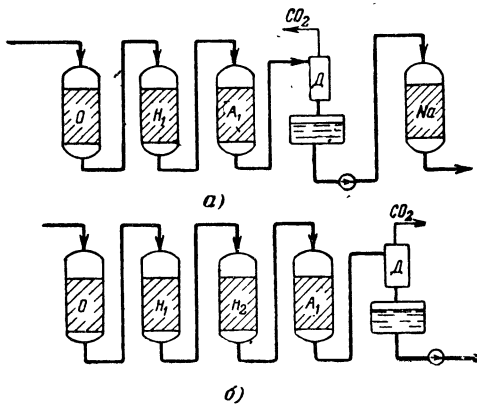


Рис. 12-1. Схемы частичного обессоливания воды.

воды, схемой предварительной обработки воды (известкование, известкование и обескремнивание) и другими условиями.

Б тех случаях, когда необходимо снизить солесодержание и щелочность обрабатываемой воды без ее обескремнивания, например для барабанных котлов давлением меньше 80 *ата*, может быть применена схема установки, изображенная на рис. 12-1,*а*, которая предназначена для частичного обессоливания воды. Она состоит из четырех групп фильтров: осветлительных *О*, водородных *Н*, анионитных A_1, загруженных слабоосновным анионитом, и натрий-катионитных *Na*, выполняющих роль барьерных фильтров. Декарбонизатор *Д*, в котором происходит удаление CO_2, включен перед натрий-катионитными фильтрами. Это — наиболее простая схема. Она позволяет снизить щелоч-

ность воды до 0,2—0,5 *мг-экв/л*. Применение ее целесообразно, если сумма анионов

$$\Sigma A = (SO_4^{2-}) + (Cl^-) + NO_3^- \leqslant 1{,}5 \ [мг\text{-}экв/л].$$

При $\Sigma A > 1{,}5$ *мг-экв/л* лучшей является схема, представленная на рис. 12-1,*б*, в которой взамен натриевых установлены водородные барьерные фильтры H_2 для более полного удаления из воды катионов Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^+, чем это возможно в схеме рис. 12-1,*а*. Полное удаление катионов из воды перед ее анионированием является основным условием глубокого ее обессоливания.

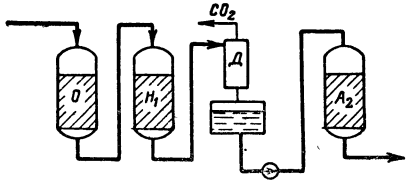


Рис. 12-2. Схема упрощенной обессоливающей и обескремнивающей установки.

Широкое применение на практике нашла упрощенная схема обессоливающей и обескремнивающей установки, изображенная на рис. 12-2. Она состоит из трех групп фильтров: осветлительных *О*, водородных H_1 и анионитных A_2, загруженных сильноосновным анионитом ЭДЭ-10П. При $\Sigma A \leqslant 1{,}5$ *мг-экв/л* эта схема позволяет получить воду с солесодержанием до 5—10 *мг/л* и кремнесодержанием до 0,1—0,3 *мг/л*, что вполне приемлемо для барабанных котлов высокого давления (90—110 *ата*). Для барабанных котлов давлением 140—185 *ата*, предъявляющих более высокие требования к качеству обессоленной воды, схемы обессоливающих установок усложняются. Одна из таких схем, нашедшая применение на практике, представлена на рис. 12-3,*а*. Она состоит уже из пяти групп фильтров и отличается от предыдущих применением двух сортов анионитов — слабоосновного (A_1) и сильноосновного (A_2). Качество обработанной по этой схеме воды характеризуется солесодержанием порядка 0,1—0,2 *мг/л* и кремнесодержанием в пределах 0,02—0,1 *мг/л* SiO_3^{2-}.

Глубокое обессоливание и обескремнивание воды требуют определенной последовательности в проведении отдельных технологических операций. Первой из них (после осветления воды на осветлительных фильтрах) является удаление из воды всех катионов, что и выполняют водородные фильтры первой ступени H_1 (рис. 12-3,*а*). Вторая операция заключается в фильтровании кислой водород-катионированной воды через анионитные фильтры со слабоосновным анионитом A_1, в которых обрабатываемая вода освобождается от анионов сильных кислот

[реакции (12-2), (12-3)]. Анионы слабых минеральных кислот (HCO^-_3, $HSiO^-_3$) слабоосновным анионитом практически не поглощаются.

После этого обессоленная вода направляется в водородные фильтры второй ступени H_2, в которых происходит полное поглощение катионов натрия. Присутствие последних в воде после фильтров H_1 и A_1 возможно по ряду причин, среди которых следует отметить: запоздалое отключение на регенерацию водородных фильтров первой ступени (которые должны отключаться в момент проскока в фильтрат натрия);

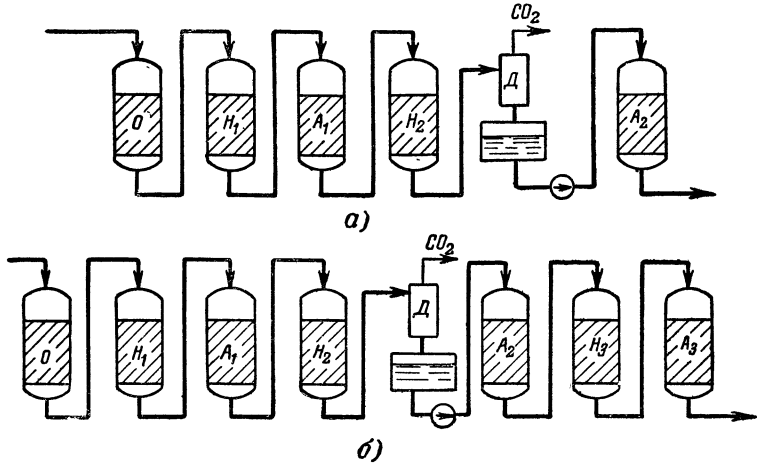


Рис. 12-3. Схемы установок для полного обессоливания воды.

О — осветлительные фильтры; H_1, H_2 и H_3 — водородные фильтры первой, второй и третьей ступеней; A_1, A_2 и A_3 — анионитные фильтры первой, второй и третьей ступеней; *Д* — декарбонизатор.

преждевременное включение в работу после регенерации анионитных фильтров A_1, когда в фильтрате возможно присутствие остатков регенерирующей щелочи; старение слабоосновного анионита.

Если катионы натрия полностью не удаляются из воды перед поступлением ее на анионитные фильтры второй ступени A_2, то это приводит к появлению в воде гидратной щелочности за счет реакции ионного обмена (12-4), препятствующей глубокому обескремниванию воды по причине возникновения противоиона OH^-.

Четвертая операция заключается в удалении в декарбонизаторе *Д* из воды CO_2, образовавшейся при водород-катионировании воды в фильтрах H_1. Углекислота хорошо поглощается сильноосновным анионитом, что приводит к быстрому его истощению и ухудшению эффекта обескремнивания. Поэтому она должна быть наиболее полно удалена из воды перед поступлением ее на фильтры A_2. Последней пятой операцией является фильтрование воды через анионитные фильтры второй ступени A_2, загруженные сильноосновным анионитом. В них происходит поглощение кремниевой кислоты

$$RaOH + H_2SiO_3 \rightarrow RaHSiO_3 + H_2O,$$

а также и анионов сильных кислот, если они присутствуют в воде.

Рассматриваемая схема обессоливающей установки (рис. 12-3,*а*) может быть использована и для приготовления воды для котлов высокого давления, 100—140 *ата*, в случаях, когда $\Sigma A > 1{,}5$ *мг-экв/л*.

Наиболее высокие и жесткие требования к качеству обессоленной воды предъявляют прямоточные котлы. В наибольшей мере этим требованиям удовлетворяет схема установки, изображенная на рис. 12-3,*б*. От предыдущей она отличается тем, что в ней имеется третья ступень ионирования, состоящая из фильтров водородных H_3 и анионитных A_3, загруженных сильноосновным анионитом. Фильтры A_3 регенерируются раствором аммиака, чтобы исключить возможность появления в фильтрате солей натрия вследствие амфотерных свойств анионита [реакция (12-9)]. Эта схема позволяет получить обессоленную воду с солесодержанием 0,05—0,1 *мг/л* и кремнесодержанием до 30 *мкг/л*.

Фильтры H_2 и A_2 или H_3 и A_3 можно заменить одной группой фильтров со смешанной загрузкой: в один фильтр загружают катионит и анионит, которые затем перемешивают сжатым воздухом. Такая смесь при фильтровании через нее воды работает как множество последовательно включенных катионитных и анионитных фильтров, в результате чего обеспечиваются более глубокое обессоливание и обескремнивание воды. Регенерация таких фильтров включает следующие операции: а) разделение катионита и анионита на отдельные слои путем обратного тока воды (гидравлическая сортировка); при этом анионит, имеющий меньший удельный вес, располагается вверху, а катионит внизу; б) раздельная регенерация анионита щелочью и катионита кислотой; в) последовательная отмывка анионита и катионита; г) перемешивание катионита и анионита сжатым воздухом.

г) Эксплуатация обессоливающих установок

Химическое обессоливание природных вод для питания паровых котлов считается целесообразным и экономически выгодным (при существующих анионитах АН-2Ф и ЭДЭ-10П), когда суммарное содержание сульфатных, хлоридных и нитратных ионов в исходной воде не превышает 4—5 *мг-экв/л*.

Эксплуатация водородных фильтров обессоливающих установок производится в основном так же, как и в водород-натрий-катионитных водоподготовительных установках. Отличие состоит в том, что водородные фильтры отключают на регенерацию не по жесткости, как в катионитных уста-

новках, а по проскоку иона натрия. Это значит, что водородные фильтры должны удалять из воды все катионы, в том числе и натрий.

Непосредственное определение содержания в фильтрате натрия представляет большие трудности. Однако момент появления его в фильтрате совпадает с понижением кислотности водород-катионированной воды. Поэтому при остановке на регенерацию водородных фильтров первой ступени руководствуются величиной кислотности фильтрата, отключая их в момент ее понижения.

Водородные фильтры второй ступени останавливают на регенерацию по объему фильтрата, т. е. после пропуска ими заданного количества воды. Оно устанавливается из расчета средней концентрации натрия в воде около 0,15 *мг-экв/л*. Скорость фильтрования воды на водородных фильтрах второй ступени может доходить до 40—60 *м/ч*.

Анионитные фильтры первой ступени загружают слабоосновным анионитом АН-2Ф. Они могут регенерироваться любой натровой щелочью — NaOH, Na_2CO_3, $NaHCO_3$. Если применяется Na_2CO_3 или $NaHCO_3$, фильтрат будет содержать углекислоту:

$$RaHCO_3 + HCl \rightarrow RaCl + \uparrow CO_2 + H_2O. \qquad (12\text{-}10)$$

Поэтому анионитные фильтры первой ступени A_1 в этом случае в схемах полного обессоливания должны включаться перед декарбонизатором, чтобы обеспечить удаление CO_2 из воды. При включении их после декарбонизатора для регенерации необходимо применять только NaOH.

В целях экономии реагентов, расход которых существенно влияет на экономику химического обессоливания воды, на практике в схемах полного обессоливания (рис. 12-3) прибегают к последовательной (совместной) регенерации двух фильтров: одного, загруженного слабоосновным анионитом, другого — сильноосновным, используя в этом случае только NaOH. Все количество реагента, необходимое для регенерации двух фильтров, в виде 2%-ного раствора пропускается вначале через сильноосновный, а затем слабоосновный анионит. Отмывка их производится в таком же порядке. Там, где нельзя применить последовательную регенерацию, анионитные фильтры первой и второй ступеней регенерируются раздельно раствором соответствующего реагента концентрацией примерно 3—6%. Удельный расход NaOH при одновременной

регенерации двух фильтров находится в пределах 80—90 *г/г-экв*. Длительность всех операций (взрыхление, пропуск раствора реагента, отмывка) при регенерации составляет для фильтров с сильноосновным анионитом 2,5 *ч*, а с слабоосновным — 4 *ч*. Температура анионируемой воды при использовании анионитов АН-2Ф и ЭДЭ-10П не должна превышать 30° С. Удельный расход воды на собственные нужды анионитных фильтров составляет около 10 $м^3/м^3$ анионита.

12-3. Электрохимическое обессоливание воды

Электрохимический способ обессоливания воды основан на использовании явлений электролиза. Хотя электролиз известен давно, однако, лишь в последнее время в связи с применением пористых ионитовых диафрагм он приобрел практическую ценность и стал перспективным.

Установка по обессоливанию воды этим вариантом электрохимического способа состоит из ионитовых диафрагм, собранных в блок, напоминающий фильтр-пресс, к концам которого приложена определенная разность по-

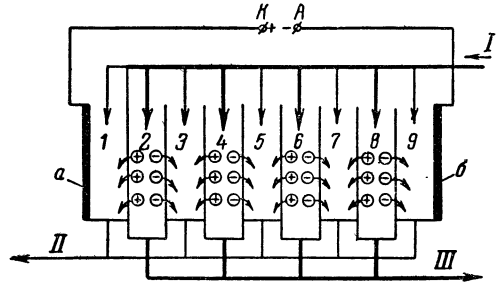


Рис. 12-4. Схема электрохимического обессоливания воды.

I — исходная вода; *II* — минерализованная вода (сброс, продувка); *III* — обессоленная вода.

тенциалов (рис. 12-4). Диафрагмы представляют собой тонкие гибкие пластины (напоминающие листовую резину), в инертный материал которых впрессованы мелкие зерна катионита (катионитовые диафрагмы) и анионита (анионитовые диафрагмы).

При погружении этих диафрагм в воду происходит диссоциация ионитов с посылкой в раствор обменных ионов. В результате зерна, а следовательно, и диафрагмы в це-

лом приобретают электрический заряд соответствующего знака: катионитовая — отрицательный, анионитовая — положительный, согласно следующим реакциям:

$$\left.\begin{aligned} NaR &\rightleftarrows R^- + Na^+; \\ RaOH &\rightleftarrows Ra^+ + OH^-. \end{aligned}\right\} \qquad (12\text{-}11)$$

Диафрагмы в блоке устанавливаются в чередующемся порядке, как указано на рис. 12-4. Если наложить на концевые металлические пластины *а* и *б* напряжение и пустить в узкие пространства (щели) между пластинами обессоливаемую воду, возникнет движение катионов к катоду *К* и анионов к аноду *А*. В ячейке *2* (четной) это движение ионов не будет иметь препятствий: катионы (+) свободно пройдут через катионитовую диафрагму (—) в катодное пространство *1*, а анионы (—) — через анионитовую (+) пластину в ячейку *3*. Таким образом, вода, проходящая ячейку *2*, будет освобождаться от катионов и анионов, т. е. обессоливаться.

В ячейке *3*, наоборот, катионы и анионы оказываются «запертыми». Катионы в своем стремлении двигаться к катоду не могут преодолеть положительного барьера, созданного анионитовой диафрагмой, точно так же, как и анионы,— отрицательно заряженную катионитовую пластину. Следовательно, вода, проходящая ячейку *3*, будет обогащаться солями за счет поступления в нее анионов из ячейки *2* и катионов из ячейки *4*.

В ячейке *4* будет происходить то же, что и в ячейке *2*, т. е. вода будет обессоливаться. В ячейке *5* солесодержание воды будет увеличиваться за счет процессов, идентичных происходящим в ячейке *3*. Таким образом, в четных ячейках вода будет обессоливаться, в нечетных — обогащаться солями. Соединяя трубопроводом четные и отдельно нечетные ячейки, получим поток обессоленной воды и воды с высоким солесодержанием. Количество последней может составлять порядка 10—20% от количества воды, поступающей на установку.

Рассматриваемый способ пригоден для обессоливания высокоминерализованных вод вплоть до морских, содержащих солей около 30 000 *мг/л*.

Считается, экономически приемлемым снижать этим способом солесодержание воды до 300—500 *мг/л*. Несмотря на это, электрохимический способ обессоливания имеет большое будущее, поскольку он решает проблему опресне-

ния минерализованных и морских вод. В комбинации с обычным ионитовым электрохимический способ делает экономически выгодным глубокое обессоливание минерализованных вод.

12-4. Обессоливание воды термическим способом

Термический способ обессоливания с применением паровых испарителей известен давно. Он заключается в том, что обессоливаемая вода испаряется, а образующийся при

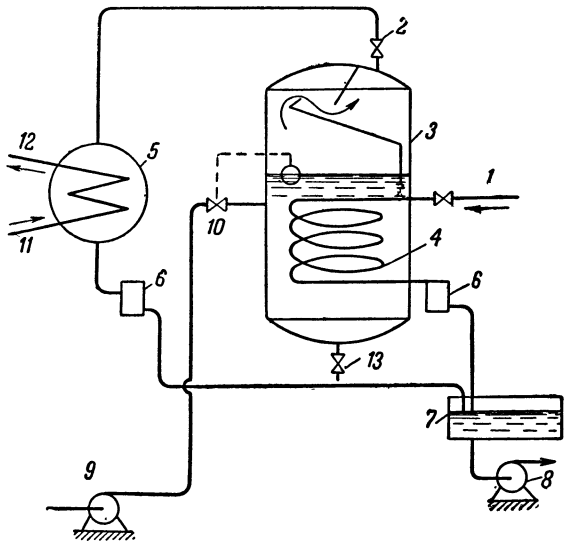


Рис. 12-5. Схема испарителя.

этом пар конденсируется. Тем самым получается конденсат, лишенный солей. Испарение воды производится в аппаратах, называемых испарителями.

Испаритель представляет собой цилиндрический металлический сосуд со сферическими днищами, в котором помещается греющий элемент *4*. Последний представляет собой трубчатый теплообменник, по трубкам которого циркулирует вода (водотрубные испарители) или пар (паротрубные испарители — рис. 12-5). Греющий пар *1* называют *первичным*. Конденсат первичного пара через конденсатоотводчик *6* стекает в сборный бак *7*. Образовавшийся в испарителе пар, называемый *вторичным*, пройдя

сепарационное устройство, поступает в охладитель (конденсатор) *5*, где превращается в конденсат и стекает далее в приемный бак. Конденсат вторичного пара называют дистиллятом.

Часто для увеличения производительности испарительной установки испарители включаются по пару последовательно (рис. 12-6). Сущность этой схемы состоит в том, что вторичный пар предыдущего по ходу пара испарителя используется в качестве первичного в последующем. Полу-

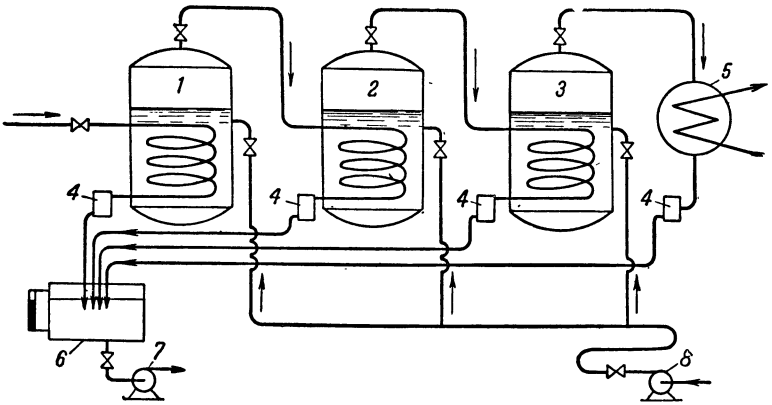


Рис. 12-6. Схема трехступенчатой испарительной установки.

ченный из последнего испарителя вторичный пар конденсируется питательной водой (конденсатом). Такие установки называются ступенчатыми. Так, на рис. 12-6 изображена схема трехступенчатой испарительной установки.

Наличие испарителей в тепловой схеме станции снижает выработку электроэнергии за счет «обесценения тепла»: на установку отбирается из турбины пар более высокого давления (более работоспособный), а получается взамен этого пар низкого потенциала. Поэтому в ряде случаев экономически более выгодно применять химическое обессоливание при помощи ионитов взамен термического.

При большой безвозвратной отдаче пара на производство и необходимости питать котлы чистым конденсатом применяют *паропреобразователи* (пароумформеры, дампфумформеры). Схема паропреобразователя представлена на рис. 12-7. Принципиальное отличие его от испарителя заключается в том, что вторичный пар паропреобразователя имеет более высокое давление и полностью отдается

заводским потребителям. Следовательно, вместо пара котлов потребители снабжаются паром преобразователей. Конденсат первичного пара преобразователей полностью возвращается в котлы.

Испарители и паропреобразователи питаются химически обработанной водой. При эксплуатации испарителей

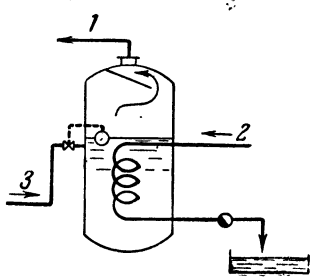


Рис. 12-7. Схема паропреобразователя.

1 — пар к производственным потребителям; *2* — греющий пар.

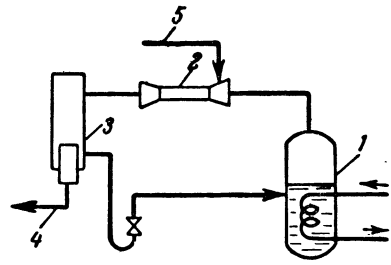


Рис. 12-8. Очистка пара по схеме МО ЦКТИ.

весьма важно получить дистиллят с минимальным содержанием солей, особенно когда он поступает в питательную систему прямоточных котлов. В значительной мере этому способствуют рациональные сепарационные устройства.

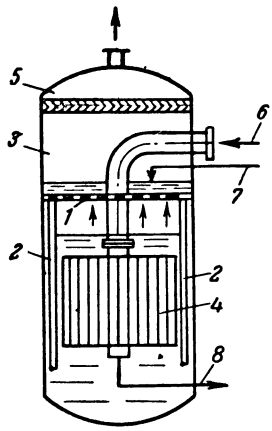


Рис. 12-9. Схема испарителя с паропромывочным дырчатым листом.

1 — дырчатый лист; *2* — сливные трубы; *3* — корпус испарителя; *4* — греющая секция; *5* — жалюзийная сепарация (шеврон); *6* — первичный пар; *7* — питательная вода; *8* — конденсат.

В последнее время предложены два способа очистки пара испарителей от загрязнений, основанные на его промывке. На рис. 12-8 представлена принципиальная схема очистки пара с применением пленочного сепаратора, предложенная Московским отделением ЦКТИ* (Аленчиков и Кемельман). Вторичный пар испарителя *1*, содержащий загрязнения, поступает в увлажнительное устройство (сопло) *2*, куда впрыскивается определенное количество (~3%) конденсата *5*. После промывки пара этот конденсат

* Центральный научно-исследовательский котлотурбинный институт имени И. И. Ползунова.

отделяется в пленочном сепараторе *3* и поступает снова в испаритель. Промытый пар *4* уходит в конденсатор, Испытания показали высокую эффективность этого способа.

Во втором способе, предложенном МО ЦКТИ (Стерман), паропромывочное устройство расположено в паровом пространстве испарителя (рис. 12-9). Оно представляет собой дырчатый лист *1*, перекрывающий все сечение испарителя, на который подается питательная вода. Этот лист создает некоторое сопротивление проходу пара, ввиду чего он равномерно распределяется по всем отверстиям. Это препятствует уходу воды сквозь отверстия, которая сливается вниз испарителя по специальным трубам *2*. Промываемый пар барботирует через слой питательной воды. Промышленная проверка этой схемы, которая более проста в эксплуатации по сравнению с предыдущей, показала хорошие результаты.

Таблица 1

Расчет водоподготовительной установки

Наименование определяемых величин	Обозначения	Размерность	Расчетная формула	Варианты		
				1	2	3
А. Исходные данные						
Расход химически обработанной воды производственными потребителями:						
а) Паровозы	q_1	*т/ч*	По заданию	10	50	30
б) Подпитка теплосети	q_2	»	То же	20	25	15
в) Технологические установки	q_3	»	» »	15	50	25
Добавка в котлы ТЭЦ	$Q_д$	»	По заданию или по расчету	25	75	100
Полная потребность в химически обработанной воде	$Q_{нт}$	»	$q_1 + q_2 + q_3 + Q_д$	70	200	170
Качество исходной воды	$H_о$	*мг-экв/л*	По данным анализа исходной воды	2,4	5,2	4,0
	$Щ_о$	»		1,1	3,7	3,2
	H_{Ca}	»		—	3,9	—
	Na	»		—	—	0,5

	$S_{св}$	*мг/л*		210	480	270
	$Q_к$	*мг/л* O_2		8,4	4,2	3,0
	SiO_2	»		—	8	—
	CO_2	»	Свободная	—	11	—
Давление пара в котлах	P	*ата*	По заданию	32	110	40
Щелочность обработанной воды	$Щ_{хв}$	*мг-экв/л*	См. табл. 4 в приложении	1,1	0,8	0,5
Принятая схема водоочистки	—	—		*к—ф—к*	*и—ф—к*	H—Na—*к*
Б. Расчет натрий-катионитовой установки (варианты 1 и 2)						
Фильтры первой ступени						
Жесткость воды, поступающей на фильтры	H'_o	*мг-экв/л*	$H_{нк} + 0{,}8$	2,4	—	4,0
Скорость фильтрования	$v_{кф}$	*м/ч*	Принимается: 1-я ступень—5÷15; 2-я—20÷30	— 15[1]	2,3 15	— 10
Рабочая емкость поглощения катионита (сульфоугля)	e_p	*г-экв/м³*	Принимается от 250 до 300	250[2]	270[2]	270
Высота слоя катионита	$h_{кт}$	*м*	Принимаем	2,0[3]	2,5[3]	2,5
Межрегенерационный период	$T_{кф}$	*ч*	$T_{кф} = \frac{h_{кт} e_p}{v_{кф} H'_o}$	14[4]	19,6[4]	18,9

Продолжение табл. 1

Наименование определяемых величин	Обозначения	Размерность	Расчетная формула	Варианты		
				1	2	3
Длительность простоя фильтра на регенерации	$\tau_{кт}$	*ч*	Обычно 1,5÷2	1,7	1,7	1,7
Количество регенераций в сутки	$n_{кт}$	—	$n_{кт} = \frac{24}{T_{кф} + \tau_{кт}}$	1,53	1,13	1,17
Потребная общая площадь катионитных фильтров	$F_{кт}$	$м^2$	$F_{кт} = \frac{24Q_{нт}}{v_{кф}(24 - n_{кт}\tau_{кт})}$	5,2	14,5	18,5
Количество фильтров	$m_{кт}$	шт.	Должно быть не менее трех[5]	3	3[6]	4
Диаметр фильтров	$d_{кт}$	*м*	Принимаем	1,5	2,5	2,5
Фактическая площадь фильтров	$F_{кт}$	$м^2$	$m_{кт}f_{ф}$[7]	5,3	14,7	19,5
Скорость фильтрования при остановке одного фильтра на регенерацию	$v'_{кф}$	*м/ч*	$v'_{кф} = \frac{Q_{нт}}{(m_{кт} - 1)f_{ф}}$[8]	19,8	20,4	—
Количество катионита в одном фильтре	$V_{кт}$	$м^3$	$V_{кт} = f_{ф}h_{кт}$	4,4	12,3	12,3
Удельный расход воды на 1 $м^3$ катионита при регенерации фильтра	$\beta_{кт}$	$м^3/м^3$	В среднем 4,5 для натрий-катионита	4,5	4,5	—
Расход воды на собственные нужды фильтров	$q_{ск}$	$м^3$/*сутки*	$q_{ск} = m_{кт}n_{кт}\beta_{кт}V_{кт}$	90	190	—
	$q'_{ск}$	$м^3/ч$	$q'_{ск} = (q_{ск} : 24)$	3,8	8,0	—
Удельный расход соли	γ_c	*г/г-экв*	Принимается в пределах 170÷250	200	200	—

Расход соли на регенерацию одного фильтра	$g_{сл}$	*кг*	$g_{сл} = e_p V_{кт} \gamma_c \cdot 10^{-3}$	220	660	—
То же на все фильтры в сутки	$\Sigma g_{сл}$	»	$\Sigma g_{сл} = g_{сл} m_{кт} n_{кт}$	840	2 240	—
Фильтры второй ступени						
Производительность (нетто) барьерных фильтров	$Q_{нт}^{б}$	*м³/ч*	Часть воды, потребляемая котлами	25[9]	75[9]	—
Скорость фильтрования	$v_{фб}$	*м/ч*	Принимается в пределах 20÷30	20	25	—
Необходимая площадь фильтров	$F_{кт}^{б}$	*м²*	$F_{кт}^{б} = \frac{Q_{нт}^{б}}{v_{фб}}$	1,25	3,0	—
Принятый диаметр фильтров	$d_{кт}^{б}$	*м*	Принимаем	1,0	1,5	—
Количество фильтров	$m_{кт}^{б}$	шт.	Не менее двух	2	2	—
Высота слоя катионита	$h_{кт}$	*м*		2	2	
Межрегенерационный период	$T_{кф}^{б}$	*ч*	Работает до истощения емкости поглощения на 85—90%			
Фактическая общая площадь фильтрования	$F_{кт}^{фб}$	*м²*	$F_{кт}^{фб} = 0{,}785 (d_{кт}^{б})^2$	1,6	3,5	—
Фактическая скорость фильтрования	$v'_{фб}$	*м/ч*	$v'_{фб} = \frac{Q_{нт}^{б}}{F_{кт}^{фб}}$	15,6	21,4	—

Продолжение табл. 1

Наименование определяемых величин	Обозначения	Размерность	Расчетная формула	Варианты		
				1	2	3
В. Расчет водород-натрий-катионитовой установки (параллельная схема, 3-й вариант)						
Доля воды, поступающей:						
а) На натрий-катионитные фильтры	X_{Na}	—	$X_{Na} = \frac{H_{нк} + \Delta Щ}{H_o}$	—	—	0,325
б) На водород-катионитные фильтры	X_H	—	$X_H = \frac{H_к - \Delta Щ}{H_o}$	—	—	0,675
Количество воды, выдаваемое:						
а) Натрий-катионитовой установкой	$Q_{нт}^{Na}$	*т/ч*	$Q_{нт}^{Na} = Q_{нт} X_{Na}$	—	—	55
б) Водород-катионитовой установкой	$Q_{нт}^{H}$	»	$Q_{нт}^{H} = Q_{нт} X_H$	—	—	115
Концентрация катионов, поглощаемых водородными фильтрами	$H_{усл}$	*мг-экв/л*	$H_{усл} = H_o + 2(Na)$[12]	—	—	5
Скорость фильтрования на водородных фильтрах	$v_ф^H$	*м/ч*	Принимаем	—	—	10
Высота слоя катионита в водородных фильтрах	$h_{кт}^H$	*м*	Принимаем	—	—	2,5

Межрегенерационный период водородных фильтров	$T^{H}_{кф}$	ч	$T^{H}_{кф} = \frac{e_p h^{H}_{кт}}{H_{усл} v^{н}_{ф}}$	—	—	13,5
Количество регенераций в сутки водородных фильтров	$n^{H}_{кт}$	—	$n^{H}_{кт} = \frac{24}{T^{H}_{кф} + \tau^{H}_{кт}}$	—	—	1,6
Потребная общая площадь водородных фильтров	$F^{H}_{кт}$	м²	$F^{H}_{кт} = \frac{Q^{H}_{нт} \cdot 24}{v^{H}_{ф}(24 - n^{H}_{кт}\tau^{H}_{кт})}$	—	—	10,3
Скорость фильтрования на натриевых фильтрах	$v^{Na}_{ф}$	м/ч	Принимаем	—	—	10
Высота слоя катионита в натриевых фильтрах	$h_{кт}$	м	Принимаем	—	—	2
Межрегенерационный период натриевых фильтров	$T^{Na}_{кф}$	ч	$T^{Na}_{кф} = \frac{e_p h_{кт}}{H_0 v^{Na}_{ф}}$	—	—	13,5
Количество регенераций в сутки натриевых фильтров	$n^{Na}_{кт}$	—	$n^{Na}_{кт} = \frac{24}{T^{Na}_{кф} + \tau^{Na}_{кт}}$	—	—	1,54
Потребная площадь натриевых фильтров	$F^{Na}_{кт}$	м²	$F^{Na}_{кт} = \frac{Q^{Na}_{нт} \cdot 24}{v^{Na}_{ф}(24 - n^{Na}_{кт}\tau^{Na}_{кт})}$	—	—	5,2
Количество водородных фильтров	$m^{H}_{кт}$	шт.	Не менее трех	—	—	3
Диаметр водородных фильтров	$d^{H}_{кт}$	м		—	—	2,5

Продолжение табл. 1

Наименование определяемых величин	Обозначения	Размерность	Расчетная формула	Варианты		
				1	2	3
Фактическая площадь фильтрования водородных фильтров	$F_{кт}^{ф\text{Н}}$	$м^2$	$F_{кт}^{ф\text{Н}} = f_{ф} m_{кт}^{\text{Н}}$	—	—	14,7
Фактическая скорость фильтрования на водородных фильтрах	$v_{ф}^{ф\text{Н}}$	$м/ч$	$v_{ф}^{ф\text{Н}} = v_{ф}^{\text{Н}} \frac{F_{кт}^{\text{Н}}}{F_{кт}^{ф\text{Н}}}$	—	—	7
Межрегенерационный период водородных фильтров фактический	$T_{кф}^{ф\text{Н}}$	$ч$	$T_{кф}^{ф\text{Н}} = T_{кф}^{\text{Н}} \frac{v_{ф}^{\text{Н}}}{v_{ф}^{ф\text{Н}}}$	—	—	14,7
Количество регенераций водородных фильтров в сутки	$n_{кт}^{\text{Н}}$	—	$n_{кт}^{\text{Н}} = \frac{24}{T_{кф}^{ф\text{Н}} + \tau_{кт}^{\text{Н}}}$	—	—	1,47
Количество натриевых фильтров	$m_{кт}^{\text{Na}}$	шт.	Не менее трех	—	—	3
Диаметр натриевых фильтров	$d_{кт}^{\text{Na}}$	$м$		—	—	1,5
Фактическая площадь натриевых фильтров	$F_{кт}^{ф\text{Na}}$	$м^2$	$F_{кт}^{ф\text{Na}} = f_{ф} m_{кт}^{\text{Na}}$	—	—	5,3
Удельный расход воды на 1 $м^3$ катионита при регенерации водородных фильтров	$\beta_{кт}^{\text{Н}}$	$м^3$	В среднем 5,5	—	—	5,5

Расход воды на регенерацию водородных фильтров в сутки	$q_{кт}^{H}$	*м³/сутки*	$q_{кт}^{H} = f_{ф} m_{кт}^{H} h_{кт} \beta_{кт}^{H} n_{кт}^{H}$	—	—	300
То же натриевых фильтров	$q_{кт}^{Na}$	*м³*	$q_{кт}^{Na} = \beta_{кт} f_{ф} h_{кт} n_{кт}^{Na} m_{кт}^{Na}$	—	—	74
Общий расход воды в сутки	$q_{о}$	»	$q_{о} = q_{кт}^{H} + q_{кт}^{Na}$	—	—	374
Расход воды в час	q_{0}'	*м³/ч*	$q_{о}' = q_{о} : 24$	—	—	15,6
Удельный расход кислоты на регенерацию водородных фильтров	$\gamma_{к}$	*г/г-экв*	Принимается в пределах 60—80	—	—	70
Расход 100-ной серной кислоты на регенерацию одного водородного фильтра	$g_{к}$	*кг*	$g_{к} = \frac{e_{р} h_{кт} f_{ф} \gamma_{к}}{1\,000}$	—	—	230
Суточный расход кислоты на все водородные фильтры	$G_{к}$	»	$G_{к} = g_{к}' m_{кт}^{H} n_{кт}^{H}$	—	—	1 020
Концентрация регенерационного рабочего раствора кислоты	$C_{во}^{к}$	%	Не выше 2%	—	—	1,5
Объем регенерирующего раствора кислоты, пропускаемого через один фильтр	$V_{рк}$	*м³*	$V_{рк} = \frac{g_{к} \cdot 100}{10^{3} C_{вп}^{к}}$	—	—	15,4
Расход соли на регенерацию одного натриевого фильтра	$g_{сл}$	*кг*	$g_{сл} = \frac{e_{р} h_{к} f_{ф} \gamma_{с}}{1\,000}$	—	—	185

Продолжение табл. 1

Наименование определяемых величин	Обозначения	Размерность	Расчетная формула	Варианты		
				1	2	3
Суточный расход соли на регенерацию всех натриевых фильтров	$G_{сл}$	*кг*	$G_{сл} = g_{сл} m_{кт}^{Na} n_{кт}^{Na}$	—	—	850
Г. Расчет осветлительных фильтров						
Производительность фильтровальной установки (нетто)	$Q_{нт}^{ф}$	*т/ч*	$Q_{нт}^{ф} = Q_{нт} + q_0'$	74	208	186
Скорость фильтрования	$v_{ф}$	*м/ч*	Принимается в пределах 4÷6[10]	4	5	5
Количество промывок осветлительных фильтров в сутки	$n_{мф}$	—	Принимается в пределах 1÷2	2	2	2
Время простоя фильтра в промывке	$\tau_{мф}$	*ч*	Обычно около 30 *мин*	0,5	0,5	0,5
Необходимая общая площадь осветлительных фильтров	$F_{мф}$	*м*^{2}	$F_{мф} = \frac{Q_{нт}^{ф} \cdot 24}{v_{мф}(24 - n_{мф}\tau_{мф})}$	19,3	43,5	39,0
Принимаемый диаметр осветлительных фильтров	$d_{мф}$	*м*	Принимаем	2,5	3,0	3,0
Тип устанавливаемых фильтров				одно-поточный	двух-поточный	двух-поточные
Количество фильтров	$m_{ф}$	шт.	Не менее трех	4	3	3

Высота слоя фильтрующего материала	$h_{сл}$	*м*	Принимаем	1,2	2	2
Длительность промывки однопоточного фильтра	$t_{мф}$	*мин*		6	—	—
Длительность промывки двухпоточного фильтра						
а) Верхнего слоя	$t'_{мф}$	*мин*	Принимается в пределах 5—6	—	6	6
б) Нижнего слоя	$t''_{мф}$	»	В пределах 10—12	—	12	12
Род фильтрующего материала				Дробленый антрацит		
Интенсивность промывки	$i_{пр}$	$л/м^2 \cdot сек$	Принимается в пределах 6—8 (для антрацита)	7	7	7
Расход воды на промывку:						
а) Однопоточного фильтра	$q_{пф}$	$м^3$	$q''_{пф} = \frac{i_{пр} f_ф t_{мф} \cdot 6}{100}$ [11]	12,5	—	—
б) Верхнего слоя		»		—	18	18
в) Нижнего слоя		»		—	36	36
г) Одного двухпоточного фильтра		»		—	54	54
Расход промывной воды на все фильтры:						
в) в сутки	$\Sigma q_{пф}$	$м^3$	$\Sigma q_{пф} = q_{пф} m_ф n_{мф}$	100	324	324
б) в час	$q'_{пф}$	$м^3/ч$	$q'_{пф} = \Sigma q_{пф} : 24$	4,15	13,5	13,5

Продолжение табл. 1

Наименование определяемых величин	Обозначения	Размерность	Расчетная формула	Варианты		
				1	2	3
Величина собственных нужд фильтровальной установки	$C_н^ф$	%	$C_н^ф = \frac{q'_{пф}}{Q_{нт}^{q'} + q'_{пф}} 100$	5,4	6,1	6,75
Количество воды, поступающее на фильтровальную установку	$Q_{бр}^ф$	*м³/ч*	$Q_{бр}^ф = Q_{нт}^ф + q'_{пф}$	78	222	200
Д. Расчет коагуляционной установки						
Применяемый реагент	—	—	$Al_2(SO_4)_3$	—	—	—
Доза коагулятора $Al_2(SO_4)_3$	$d_{кг}$	*мг-экв/л*	В пределах 0,2—1,0	0,8	—	—
Концентрация рабочего раствора коагулятора	$C_{вп}^к$	%	5÷10	6	—	—
Содержание $Al_2(SO_4)_3$ в техническом продукте	$C_{кг}$	%	По ОСТ 18180-40	45,3	—	—
Расход технического коагулятора в сутки	$g_{кг}$	*кг*	$g_{кг} = \frac{Q_{бр}^ф d_{кг} \cdot Э_к \cdot 24}{10 C_{кг}}$	192	—	—
Доза щелочи для подщелачивания коагулируемой воды	$\Delta Щ_к$	*мг-экв/л*	$\Delta Щ_к = d_{кг} + 0{,}4 - Щ_о$	0,1	—	—
Суточный расход NaOH	$g_щ$	*кг/сутки*	$g_щ = Q_{бр}^ф \Delta Щ_к Э_к \cdot 24 \cdot 10^{-3}$	7,5	—	—

Суточный объем раствора коагулятора	$V_р$	*л*	$V_р = \frac{g_{кг} C_{кг}}{C^к_{вп}}$	1 450	—	—
Принимаемый размер шайбовых дозаторов						
а) Диаметр	$d_д$	*мм*	Принимаем	670		
б) Объем	$V_д$	*л*		500		
в) Количество	$m_д$	шт.		2	—	—
Е. Расчет известково-обескремнивающей установки						
А. Отстойник						
Расход воды на собственные нужды известковой водоочистки	$C^{из}_н$	%	Принимается в пределах 2,0÷2,5 от производительности отстойника брутто	—	2	—
Количество воды, поступающее на отстойник (производительность брутто)	$Q_{бр}$	*т/ч*	$Q_{бр} = Q^ф_{бр}\left(1 + \frac{C^{"з}_н}{100}\right)$	—	226	—
Температура обрабатываемой воды	t	°С	40÷45	—	45	—
Время пребывания воды в отстойнике	$t_{от}$	*ч*	По нормам на стр. 176	—	3	—
Скорость подъема воды в отстойнике	$v_{от}$	*м/ч*	То же	—	2,5	—

Продолжение табл. 1

Наименование определяемых величин	Обозначения	Размерность	Расчетная формула	Варианты		
				1	2	3
Необходимый объем отстойника	$V_{от}$	$м^3$	$V_{от} = Q_{бр} t_{от}$	—	672	—
Принимаемый размер отстойника						
а) Диаметр	$d_{от}$	$м$	Принимаем	—	8	—
б) Объем	$V_{от}$	$м^3$		—	370	—
в) Площадь сечения	$F_{от}$	$м^2$		—	50	—
г) Количество отстойников	$m_{от}$	шт.		—	2	—
Б. Сатуратор						
Величина дозы извести	$R_{из}$	*мг-экв/л*	$R_{из} = H_к + H_{Mg} + H_{CO_2} + \alpha$	—	5,8	—
Крепость известкового раствора	$K_{из}$	»		—	46	—
Доля воды, отсекаемой на сатуратор (известковая перегородка)	$L_{из}$	—	$L_{из} = \frac{R_{из}}{R_{из} + K_{из}}$	—	0,112	—
Количество воды, поступающее в сатуратор (производительность сатуратора)	$Q_{сат}$	$т/ч$	$Q_{сат} = Q_{бр} L_{из}$	—	25,3	—

Время пребывания воды в сатураторе	$t_{сат}$	*ч*	8÷10	—	8	—
Необходимый объем сатуратора	$V_{сат}$	*м*³	$V_{сат} = Q_{сат} t_{сат}$	—	200	—
Принимаемый размер сатуратора:						
а) Диаметр	$d_{сат}$	*м*	Принимаем	—	4,0	—
б) Объем	$V_{сат}$	*м*³		—	95	—
в) Площадь сечения	$F_{сат}$	*м*²		—	12,6	—
г) Количество аппарато	$m_{сат}$	шт.		—	2	—
Время работы сатуратора между перезарядками	t_c	*ч*	Принимается не менее 12	—	15	—
Содержание CaO в техническом продукте	$C_{из}$	%	Должно быть не менее 60	—	60	—
Количество технической извести, загружаемой в сатураторы	$g_{из}$	*кг*	$g_{из} = \frac{28 R_{ж} Q_{ср} t_c \cdot 100}{1\,000 C_{из}}$	—	920	—
Часовой расход извести	$g'_{из}$	»	$g_{из} : 24$	—	61	—
Качество умягченной воды:						
а) жесткость	H'_o	*мкг-экв/л*	По табл. 4 приложения	<5	<5	<5
б) щелочность	$Ш'_0$	»		0,4	1,0	0,5

Продолжение табл. 1

Наименование определяемых величин	Обозначения	Размерность	Расчетная формула	Варианты		
				1	2	3
в) сухой остаток	S_x	*мг/л*	$S_{св} + 5H_o + 18d_к - 3{,}5\delta Ок$	207	—	—
			$S_{св} - 50(H_к - Щ_к) + 8H_{Mg} + 37\alpha - 3{,}5\delta Ок$	—	367	—
			$S_{св} - 48X_н H_к + 5(1 - X_н)H_o$	—	—	182
г) кремнесодержание	S_x^{Si}	»	$\delta Ок$ — снижение окисляемости воды, *мг/л* O_2.	—	1,0	—

1. Меньшие скорости фильтрования принимаются для вод с большей жесткостью. При $H_O = 7 \div 8$ *мг-экв/л* скорость фильтрования следует принимать не выше 6 — 8 *м/ч*.

2. Для прямоточных установок с длительной коагуляцией воды рабочую емкость целесообразно принимать несколько меньшей (на 7 ÷ 10%), учитывая ее уменьшение в процессе эксплуатации из-за заноса катионита гидроокисью алюминия.

3. Большая высота слоя принимается для жестких вод, когда величина межрегенерационного периода делается меньше 8 ÷ 10 *ч*.

4. Длительность работы фильтра между регенерациями целесообразно принимать не меньше 10 ÷ 12 *ч*.

5. Это требование предусматривает, чтобы при регенерации и при ремонте из работы выводилось не больше 30% всей площади фильтрования. Если же имеются буферные емкости, достаточные по объему, можно устанавливать меньшее число фильтров.

6. В этом варианте можно было бы установить пять фильтров диаметром 2 *м* взамен трех. Однако в этом случае потребуется больше производственной площади и больше металла на фильтры.

7. Если окажется, что $F'_{кф} \gg F_{кт}$, необходимо определить фактические величины $V_{кф}$, $T_{кф}$, исходя из принятой $F'_{кт}$.

8. Следует учитывать, что высокие скорости фильтрования требуют повышенного напора насосов.

9. Двойное катионирование (барьерные фильтры) целесообразно применять для обработки воды для потребителей, требующих ее глубокого умягчения. Потребители химически обработанной воды, поименованные в п. 1 „а", „б" и „в", этого не требуют.

10. При наличии длительно проходимой коагуляции на фильтрах скорость фильтрования принимается не выше 4 *м/ч*.

11. Формула общая. Для определения частных значений по пп. „а", „б", „в" и „г" следует подставить соответствующие им значения $t_{мф}$.

12. В расчетах величина e_p принята по Ca и Mg. Так как e_p по натрию примерно в 2 раза меньше, то при определении $H_{усл}$ концентрация (Na) должна быть удвоена.

Таблица 2

Расчет водного режима котлов

Наименование определяемых величин	Обозначения	Размерность	Расчетная формула	Варианты		
				1	2	3
А. Исходные данные						
Количество котлов	$n_к$	шт.	По заданию	3	4	3
Тип котлов	—	—	То же	ТП	ТП	ТП
Давление пара	P	*ати*	» »	40	110	35
Паропроизводительность одного котла	$D_п$	*т/ч*	» »	75	170	150
Общая паропроизводительность котлов	$\Sigma D_п$	»	$\Sigma D_п = D_п n_к$	225	680	450
Наличие ступенчатого испарения	—	—		Есть	Есть	Есть
Качество котловой воды расчетное:						
а) сухой остаток	$S_{кв}$	*мг/л*	Соленый отсек	1 500	1 500	2 000
б) щелочность	$Ш_{кв}$	*мг-экв/л*	То же	6	4	8
в) кремнесодержание	$S^{Si}_{кв}$	*мг/л*	» »	—	15	—
Б. Расчет						
Внутристанционные потери конденсата	$П'_{ст}$	%	По ПТЭ	2,5	2,5	2,5
Потери на производстве	$П_д$	*т/ч*	По заданию	16	40	80
	$П'_д$	%	$П'_д = (П_д : \Sigma D_п)\,100$	7,1	5,9	17,8

Продолжение табл. 2

Наименование определяемых величин	Обозначения	Размерность	Расчетная формула	Варианты		
				1	2	3
Суммарные потери конденсата	$\Sigma П_о$	%	$\Sigma П_о = П'_{ст} + П'_д$	9,6	8,4	20,3
Давление в расширителе непрерывной продувки	$P_{рш}$	*ати*		0,7	0,7	0,7
Теплосодержание:						
а) котловой воды при давлении в котле	i_0	*ккал/кг*	По паровым таблицам	258	344	249
б) то же при давлении в расширителе	$i_{рш}$	»		112	112	112
в) пара из расширителя	$i_{пр}$	»		643	643	643
Доля котловой воды, испаряющейся в расширителе непрерывной продувки	β	—	$\beta = \frac{i_0 - i_{рш}}{i_{пр} - i_{рш}}$	0,27	0,434	0,254
Величина продувки котлов (по отношению к паропроизводительности их):						
а) по щелочности	$p_п^{щ}$	%	$p_п^{щ} = \frac{\Sigma П_о Щ_х}{Щ_{кв} - (1 - \beta) Щ_х}$	0,67	2,60	1,33
б) по сухому остатку	$p_п^{с}$	%	$p_п^{с} = \frac{\Sigma П_о S_х}{S_{кв} - (1 - \beta) S_х}$	1,48	2,38	2,0

в) по кремнесодержанию	p_n^{Si}	%	$p_n^{Si} = \frac{\Sigma П_o S_x^{Si}}{S_{кв}^{Si} - (1-\beta) S_x^{Si}}$	—	0,58	—
Показатель качества воды, лимитирующий продувку				$S_{кв}$	$Ш_{кв}$	$S_{кв}$
Количество химически обработанной воды, добавляемое в питательную систему котлов (добавка ХОВ)	Q_x	*т/ч*	$Q_x = П_д + \frac{П'_{ст}}{100}\Sigma D_n + \frac{p_n}{100}\Sigma D_n(1-\beta)$	24,2	67,0	98,0
	α_x	%	$\alpha_x = \frac{Q_x}{\Sigma D_n\left(1+\frac{p_n}{100}\right)}$	10,5	9,7	21,4
Качество питательной воды:						
а) солесодержание	$S_{пв}$	*мг/л*	$S_{пв} = \frac{\alpha_x}{100} S_x$	21,6	35,5	39,0
б) щелочность	$Ш_{пв}$		$Ш_{пв} = \frac{\alpha_x}{100} Ш_x$	42	97	112
в) кремнесодержание	$S_{пв}^{Si}$	"	$S_{пв}^{Si} = \frac{\alpha_x}{100} S_x^{Si}$	—	0,1	—

Таблица 3

Расчет фосфатного режима котлов

Наименование определяемых величин	Обозначения	Размерность	Расчетная формула	Варианты 1	2	3
А. Исходные данные						
Количество питательной воды	$D_{пв}$	*т/ч*	$D_{пв} = \Sigma D_n \left(1 + \frac{p_n}{100}\right)$	228	698	459
Содержание в исходной воде						
SO_4^{2-}	$S_{св}^{сф}$	*мг/л*	По анализу	45	105	35
SiO_3^{2-}	$S_{св}^{ск}$	»	То же	8,5	8,0	10
Б. Расчет						
Содержание в химически обработанной воде:						
SO_4^{2-}	$S_x^{сф}$	»	$S_x^{сф} = 48 d_{кг} + S_{св}^{сф}$	83,4	—	—
			$S_x^{сф} = S_{св}^{сф}$	—	105	35
SiO_3^{2-}	$S_x^{ск}$	»	$S_x^{ск} = 0{,}6 S_{св}^{ск}$	5,1	—	—
			$S_x^{ск} = S_{св}^{ск}$	—	—	10
Содержание в питательной воде:				—	1,0	—
SO_4^{2-}	$S_{пв}^{сф}$	»	$S_{пв}^{сф} = \alpha_x \cdot 10^{-2} S_x^{сф}$	8,7	10,2	7,5
SiO_3^{2-}	$S_{пв}^{ск}$	»	$S_{пв}^{ск} = \alpha_x \cdot 10^{-2} S_x^{ск}$	0,53	0,1	2,1

Содержание в котловой воде соленых отсеков:						
SO_4^{2-}	$S_{кв}^{сф}$	мг/л	$S_{кв}^{сф} = \frac{100 + p_n}{p_n} S_{пв}^{сф}$	570	400	360
SiO_3^{2-}	$S_{кв}^{ск}$	»	$S_{кв}^{ск} = \frac{100 + p_n}{p_n} S_{пв}^{ск}$	35,7	3,8	107
Паропроизводительность второй ступени в % от D_n	n	%	По данным завода-изготовителя	6	12	10
Кратность концентрации котловой воды между ступенями	$K_к$	—	$K_к = 1 + \frac{n}{p_n}$	5	5,6	6
Содержание в котловой воде чистого отсека:						
SO_4^{2-}	$S_{кв}^{сф'}$	мг/л	$S_{кв}^{сф'} = S_{кв}^{сф} : K$	114	71	60
SiO_3^{2-}	$S_{кв}^{ск'}$	»	$S_{кв}^{ск'} = S_{кв}^{ск} : K$	7,3	0,68	18
Избыток PO_4^{3-} в котловой воде:						
а) чистого отсека	$i_{ф}^{р}$	»	$i_{ф}^{р} = 7 + 0{,}1S_{кв}^{ск'} + 0{,}01S_{кв}^{сф'}$	9	7,8	9,4
б) соленого отсека	$i_{ф}^{р''}$	»	$i_{ф}^{р''} = i_{ф}^{р} K$	45	43	56
Содержание PO_4^{3-} в техническом продукте	$C_{ф}$	%	По ГОСТ 201-41	24	24	24
То же $Na_2PO_4 \cdot 12H_2O$	$C'_{ф}$	%		95	95	95

Продолжение табл. 3

Наименование определяемых величин	Обозначения	Размерность	Расчетная формула	Варианты		
				1	2	3
Расход технического тринатрийфосфата на 1 m пара	$q_{ф}$	$г/т$	$q_{ф}=\frac{100}{C_{ф}}\left[28{,}5H_{о}(1+p_{п})+ i^{p}_{ф}p_{п}\right]$	3,4	5,3	5,3
То же в час на все котлы	$\Sigma q_{ф}$	$кг/ч$	$\Sigma q_{ф}=\frac{\Sigma D_{п}}{10C_{ф}}\left[28{,}5H_{о}(1+p_{п})+ i^{p}_{ф}p_{п}\right]$	0,85	4,0	2,9
Период времени, на который приготовляется раствор фосфата	$t_{фс}$	$ч$	$8 \div 24$	12	12	12
Производительность насоса-дозатора	$q_{нд}$	$л/ч$		60	60	60
Средняя расчетная нагрузка-насоса дозатора	$q'_{нд}$	»	Принимаем	40	40	40
Концентрация рабочего раствора фосфата	$C^{ф}_{вп}$	%	$C^{ф}_{вп}=\frac{41{,}3\Sigma q_{ф}}{q''_{нд}\gamma^{ф}_{р}}C'_{ф}$	0,87	4,1	3,0

Таблица 4

Качество воды, обработанной по различным схемам

Схема водоочистки	Жесткость, *мкг-экв/л*	Щелочность, *мг-экв*	Сухой остаток, *мг/л*
Известкование	$[H_{нк} + (0{,}7 \div 1{,}0)]\,10^3$	$(0{,}7 \div 1{,}0) + \alpha$	$(Ca^{2+}) : (HCO_3^-) > 1$
			$S_{из} = S_{св} - 50\,(H_к - Щ_к^o) + 8H_{Mg} + 37\alpha - 3{,}5\delta O_к$
			$(Ca^{2+}) : (HCO_3^-) < 1$
			$S_{из} = S_{св} - 50\,(H_к - Щ_к^o) - 42\,(H_к - H_{Ca}) + 8H_{нк} + 37\alpha - 3{,}5\delta O_к$
			$(Ca^{2+}) : (HCO_3^-) > 1$
Содоизвесткование	250 — 350	1,3÷1,6	$S_{Cu} = S_{св} - 50\,(H_к - H_{ум}) + 3\,(H_{Ca} - H_к) + 11H_{Mg} + 40Щ_г^u + 53Щ_к^u - 3{,}5\delta O_к$
			$(Ca^{2+}) : (HCO_3^-) < 1$

Продолжение табл. 4

Схема водоочистки	Жесткость, *мкг-экв/л*	Щелочность, *мг-экв*	Сухой остаток, *мг/л*
			$S_{Cu} = S_{св} - 50\,(H_{Ca} - H_{ум}) - 42\,(H_к - H_{Ca}) + 11H_{нк} + 40Щ_г^т + 53Щ_к^т - 3{,}5\delta Ок$
Фильтрование — натрий-катионирование	I ст. 10—20 II ст. 3—10	Равна щелочности исходной воды	$S_х = S_{св} + 5H_о$
Коагуляция - фильтрование — натрий-катионирование	I ст. 10—20 II ст. 3—10	$Щ_{св} - d_{кг}$	$S_х = S_{св} + 5H_о + 18d_{кг} - 3{,}5\delta Ок$ (без дозировки щелочи)
Известкование—фильтрование — натрий-катионирование	I ст. 10—20 II ст. 3—10	$(0{,}7 \div 1{,}0) + \alpha$	$S_х = S_{из} + 5H_{из}$
Параллельное (*А*) или последовательное (*Б*) водород-натрий-катионирование	I ст. 10—20 II ст. 3—10	$А = 0{,}4 - 0{,}5$ $Б = 0{,}6 - 0{,}7$	$S_х = S_{св} - 48X_н H_к + 5(1 - X_н)\,H_о - 3{,}5\delta Ок$

Обозначения; α—избыток $Ca(OH)_2$, *мг-экв/л*; $\delta Ок$ — снижение окисляемости обрабатываемой воды, *мг/л* O_2, $Щ_г^и$, $Щ_к^и$ — избыточная гидратная и карбонатная щелочность содоизвесткованной воды; $d_{кг}$ — доза коагулятора, *мг-экв/л*; $X_н$ — доля воды, направляемой на Н-катионитные фильтры; $Щ_к^о$ — карбонатная щелочность известкованной воды; $H_{из}$ — жесткость известкованной воды; $H_о$ — общая жесткость исходной воды.

Таблица 5

Молекулярные и эквивалентные веса употребительных соединений

Наименование соединений	Обозначение	Молекулярный или атомный вес	Эквивалентный вес
1. Алюминий гидроокись	$Al(OH)_3$	77,99	25,99
2. Алюминий сернокислый	$Al_2(SO_4)_3$	342,12	57,02
3. Алюминий сернокислый	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	666,40	110,00
4. Железо гидрат окиси	$Fe(OH)_3$	106,86	35,62
5. „ „ закиси	$Fe(OH)_2$	89,84	44,92
6. „ сернокислое закисное	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	278,03	139,0
7. Железо хлористое	$FeCl_2$	126,75	63,6
8. „ хлорное	$FeCl_3 \cdot 4H_2O$	198,82	99,46
9. Кальций	Ca	40,07	20,04
10. „ двууглекислый	$Ca(HCO_3)_2$	162,0	81,0
11. „ едкий	$Ca(OH)_2$	74,09	37,04
12. „ окись	CaO	56,7	28,35
13. „ сернокислый	$CaSO_4$	136,13	68,06
14. „ углекислый	$CaCO_3$	100,07	50,03
15. „ фосфорнокислый	$Ca_3(PO_4)_2$	310,25	51,7
16. „ хлористый	$CaCl_2$	111,0	55,5
17. Кремний окись	SiO_2	60,06	30,03
18. „ анион кремниевой кислоты	SiO_3^{2-}	76,06	38,03
19. Магний	Mg	24,32	12,16
20. „ двууглекислый	$Mg(HCO_3)_2$	146,34	73,17
21. „ едкий (бруцит)	$Mg(OH)_2$	58,34	29,17
22. „ окись	MgO	40,32	20,16
22а. „ сернокислый	$MgSO_4$	120,39	60,20
23. „ углекислый	$MgCO_3$	84,32	42,16
24. „ хлористый	$MgCl_2$	95,24	47,62
25. Натрий	Na	23,0	23,0
26. „ двууглекислый	$NaHCO_3$	84,0	84,0
27. „ едкий	NaOH	40,0	40,0
28. „ углекислый	Na_2CO_3	106,0	53,0
29. „ хлористый	NaCl	58,45	58,45
30. „ фосфорнокислый	Na_3PO_4	163,97	54,66
31. Натрий сернокислый	Na_2SO_4	142,06	71,03
32. Натрий сернистокислый	Na_2SO_3	126,06	63,03
33. „ азотнокислый	$NaNO_3$	85,01	85,01
34. Кислота серная	H_2SO_4	98,08	49,04
35. „ соляная	HCl	36,47	36,47

Таблица 6

Растворимость и произведение растворимости некоторых труднорастворимых веществ

№	Формула вещества	Произведение концентраций ионов	Произведение растворимости	Растворимость		
				моль/л	*мг/л*	*мг-экв*
1	$CaCO_3$	$[Ca^{+2}]\ [CO_3^{-2}]$	$4{,}8\cdot10^{-9}$	$6{,}9\cdot10^{-5}$	6,9	0,138
2	$MgCO_3$	$[Mg^{+2}]\ [CO_3^{-2}]$	$1{,}0\cdot10^{-5}$	$3{,}2\cdot10^{-3}$	269	6,4
3	$ZnCO_3$	$[Zn^{+2}]\ [CO_3^{-2}]$	$2{,}7\cdot10^{-8}$	$117\cdot10^{-4}$	21,2	0,34
4	$FeCO_3$	$[Fe^{+2}]\ [CO_3^{-2}]$	$2{,}5\cdot10^{-11}$	$5{,}0\cdot10^{-6}$	0,58	0,01
5	$MnCO_3$	$[Mn^{+2}]\ [CO_3^{-2}]$	$8{,}8\cdot10^{-11}$	$9{,}3\cdot10^{-6}$	1,07	0,018
6	$Al(OH)_3$	$[Al^{+3}]\ [OH^-]^3$	$1{,}9\cdot10^{-33}$	$2{,}9\cdot10^{-9}$	$0{,}2\cdot10^{-3}$	$0{,}8\cdot10^{-5}$
7	$Fe(OH)_2$	$[Fe^{+2}]\ [OH^-]^2$	$1{,}64\cdot10^{-14}$	$1{,}6\cdot10^{-5}$	1,44	0,03
8	$Fe(OH)_3$	$[Fe^{+3}]\ [OH^-]^3$	$1{,}1\cdot10^{-36}$	$4{,}5\cdot10^{-10}$	$4\cdot10^{-5}$	$7{,}5\cdot10^{-7}$
9	$Mg(OH)_2$	$[Mg^{+2}]\ [OH^-]^2$	$5\cdot10^{-12}$	$1{,}7\cdot10^{-4}$	9,8	0,34
10	$Mn(OH)_2$	$[Mn^{+2}]\ [OH^-]^2$	$4\cdot10^{-14}$	$2{,}1\cdot10^{-5}$	1,87	0,04
11	$Zn(OH)_2$	$[Zn^{+2}]\ [OH^-]^2$	$1{,}10\cdot10^{-17}$	$3{,}2\cdot10^{-9}$	$3\cdot10^{-14}$	$6\cdot10^{-6}$
12	$Cu(OH)_2$	$[Cu^{+2}]\ [OH^-]^2$	$5{,}6\cdot10^{-20}$	$2{,}4\cdot10^{-7}$	$2{,}3\cdot10^{-2}$	$4{,}8\cdot10^{-4}$
13	$CaSO_4$	$[Ca^{+2}]\ [SO_4^{-2}]$	$6{,}1\cdot10^{-5}$	$7{,}8\cdot10^{-3}$	1 060	15,6
14	$BaSO_4$	$[Ba^{+2}]\ [SO_4^{-2}]$	$1{,}08\cdot10^{-10}$	$1{,}0\cdot10^{-5}$	2,3	0,02
15	CaF_2	$[Ca^{+2}]\ [F^-]^2$	$3{,}95\cdot10^{-11}$	$2{,}1\cdot10^{-4}$	1,24	0,04
16	CuCl	$[Cu^+]\ [Cl^-]$	$1{,}8\cdot10^{-7}$	$4{,}3\cdot10^{-4}$	42,5	0,86

Таблица 7

Удельные веса водных растворов некоторых веществ (при 18° С)

Процентное содержание безводного вещества	$Al_2(SO_4)_3$	$FeSO_4$	$NaNO_3$	Na_2CO_3	Na_2HPO_4	Na_3PO_4	NaCl
1	1,009	1,009	1,005	1,010	1,009	1,009	1,007
2	1,019	1,018	1,012	1,020	1,020	1,019	1,015
3	—	—	—	1,031	1,031	1,030	1,022
4	1,040	1,038	1,025	1,041	1,043	1,041	1,029
5	—	—	—	1,052	1,055	1,052	1,035
6	1,061	1,058	1,039	1,062	1,067	1,062	1,044
7	1,083	1,079	1,053	1,083	—	1,085	1,059
10	1,105	1,100	1,067	1,105	—	1,108	1,073
12	1,129	1,122	1,082	1,127	—	—	1,089

Таблица 8

Качество реагентов

Наименование реагента	Формула	Содержание в техническом продукте, %	ГОСТ
Сернокислый алюминий	$Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$	88,5	ГОСТ 5155-49
Железный купорос	$FeSO_4 \cdot 7H_2O$	53,0	ГОСТ 6981-54
Натр едкий	NaOH	Сорт А 95,0 Сорт Б 92,0	ГОСТ 2263-43
Сода кальцинированная	Na_2CO_3	98,0	ГОСТ 5100-49
Серная кислота	H_2SO_4	Камерная 65,0 Башенная 75,0	ГОСТ 2184-43
Соляная кислота	HCl	27,5	ГОСТ 1382-42
Тринатрийфосфат	$Na_3PO_4 \cdot 12H_2O$	Сорт 1 95,0 Сорт 2 92,0 Сорт 3 88,0	ГОСТ 201-41
Сульфит натрия	$Na_2SO_3 \cdot 7H_2O$	88,0	ГОСТ 903-41

ЛИТЕРАТУРА

1. Стырикович М. А., Внутрикотловые процессы, Госэнергоиздат, 1954.
2. Маргулова Т. Х., Методы получения чистого пара, Госэнергоиздат, 1955.
3. Мамет А. П., Коррозия теплосилового оборудования электростанций, Госэнергоиздат, 1952.
4. Турчинович В. Т., Улучшение качества воды, Стройиздат, 1940.
5. Шкроб М. С., Водоподготовка, Госэнергоиздат, 1950.
6. Вопросы проектирования и эксплуатации водоподготовительных установок на тепловых электростанциях, под редакцией доктора техн. наук М. С. Шкроба, Госэнергоиздат, 1955.
7. Организация водообработки и водного режима в котельных малой и средней мощности, Госэнергоиздат, 1956.
8. Пацуков Н. Г. и Мартынова О. И., Химический контроль на электростанциях, Госэнергоиздат, 1955.
9. Белан Ф. И., Рационализация работы водоподготовительных установок металлургических предприятий, Металлургиздат, 1952.
10. Крушель Г. Е., Образование и предотвращение отложений в системах водяного охлаждения, Госэнергоиздат, 1955.
11. Акользин П. А., Коррозия металла паровых котлов, Госэнергоиздат, 1957.
12. Мостофин А. А., Электрические солемеры для контроля качества пара и котловой воды, Госэнергоиздат, 1951.
13. Стерман Л. С., Испарители, Госэнергоиздат, 1956.
14. Исследования по водоподготовке, Госстройиздат, 1956.
15. Шапкин И. Ф., Водоподготовка на тепловых электростанциях, Госэнергоиздат, 1954.
16. Мещерский Н. А., Солемеры (устройство, эксплуатация и проверка), Госэнергоиздат, 1954.
17. Водоподготовка, под редакцией канд. техн. наук В. Ф. Ладыщкого, Госэнергоиздат, 1952.