

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Северо-Кавказский федеральный университет»

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

КУРС ЛЕКЦИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ
«ВОДОПОДГОТОВКА»

для студентов, обучающихся по направлению подготовки
08.03.01. – Строительство

Ставрополь, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

	ВВЕДЕНИЕ	5
1	СВЕДЕНИЯ О ПРИРОДНЫХ ВОДАХ	6
	Лекция 1	
1.1	Диссоциация воды	6
1.2	Солевой состав воды, примеси	7
1.3	Влияние примесей на работу котла. Механизм образования накипи	12
2	ОСВЕТЛЕНИЕ ВОДЫ (предочистка)	21
	Лекция 2	
2.1	Физико-химические основы и технология коагуляции; организация процесса в осветлителях	21
2.2	Обработка воды осаждением – известкование и реагентное умягчение воды	23
2.3	Фильтрация воды	26
3	ОБРАБОТКА ВОДЫ МЕТОДОМ ИОННОГО ОБМЕНА	30
	Лекция 3	
3.1	Теория ионного обмена	30
	Лекция 4	
3.2	Технология ионного обмена	36
4	МЕТОДЫ СТАБИЛИЗАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ	55
	Лекция 5	
4.1	Показатели стабильности воды	55
4.2	Методы стабилизации воды	55
5	УДАЛЕНИЕ ИЗ ВОДЫ РАСТВОРЕННЫХ ГАЗОВ	57
5.1	Теоретические основы деаэрации воды	57

5.2	Деаэраторы и декарбонизаторы	58
6	ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ВОДЫ	64
	Лекция 6	
6.1	Магнитная обработка воды	64
6.2	Электролиз	64
6.3	Обратный осмос	66
7	ВОДОПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ	68
	Лекция 7	
7.1	Питательные устройства	68
7.2	Оборудование ХВО	77
7.3	Эксплуатация ВПУ: контрольно-измерительные приборы; средства автоматизации ВПУ	81
8	ВОДНОХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ОБЪЕКТОВ ТГВ	92
	Лекция 8	
8.1	Обработка котловой воды	92
8.2	Определение необходимой продувки котла и способы ее уменьшения	95
9	ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ВОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ВПУ	100
	Лекция 9	
9.1	Фильтры непрерывного действия	100
9.2	Термическое умягчение и обессоливание	111
9.3	Схемы ХВО с сокращенными стоками, бессточные схемы	113
	СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	119

ВВЕДЕНИЕ

Значение и задачи водоподготовки и водно-химического режима объектов теплогазоснабжения и вентиляции (ТГВ)

В промышленности и коммунальной энергетике, а также в сельском хозяйстве страны работают десятки тысяч паровых и водогрейных котлов средних и низких параметров. Их надёжная работа во многом определяется ведением рационального водно-химического режима (ВХР).

Опыт эксплуатации и научные исследования убеждают, что создать и поддерживать совершенно безнакипный режим почти невозможно, в некоторых случаях *экономически и экологически не целесообразно*. Резкое повышение требований к охране окружающей среды привело к необходимости уменьшения количества загрязняемости сточных вод, сбрасываемых в водоёмы. Хотя повышение требований к качеству питательной воды увеличивает срок службы теплового оборудования, снижает капитальные затраты на его изготовление, но, с другой стороны, затрачиваются дополнительные средства на вспомогательное оборудование, реагенты и увеличивается загрязнённость среды. Так, например, при средней степени минерализации исходной воды и производительности установки 50 т/ч себестоимость осветлённой и умягченной воды составляет около 160 руб./т, а для обессоливания – соответственно до 700 руб./т. Результаты исследований, проведённых в НПО ЦКТИ, свидетельствуют о том, что котлы с давлением до 6 МПа экономически целесообразно питать добавочной водой, приготовленной без обессоливания. Поэтому схемы установок и требования к качеству обработанной воды должны рассматриваться в связи с этими требованиями.

1. СВЕДЕНИЯ О ПРИРОДНЫХ ВОДАХ

Лекция 1

1.1 Диссоциация воды

Основные физические свойства воды: температура плавления $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура кипения $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ при н. у. (750 мм рт. ст.); критическая температура $t=374,15\text{ }^{\circ}\text{C}$; критическое давление $p=218,53$ бар; критическая плотность $\rho=0,32\text{ г/см}^3$ (кг/м^3) ($\rho=1/U$, где U – удельный объем ($\text{м}^3/\text{кг}$)).

Молекулы воды диссоциируют на ионы:



При статическом равновесии скорости прямого (диссоциации) и обратного (ассоциации) процессов равны:

$$U_1 = K_1 C_{\text{H}_2\text{O}} \text{ и } U_2 = K_2 C_{\text{H}^+} C_{\text{OH}^-};$$

$$U_1 = U_2, \quad (1.2)$$

и следовательно,

$$C_{\text{H}^+} C_{\text{OH}^-} = \frac{K_1}{K_2} C_{\text{H}_2\text{O}} = K_w,$$

где $C_{\text{H}^+}, C_{\text{OH}^-}, C_{\text{H}_2\text{O}}$ – концентрации, г-ион/л (г-ион – это количество вещества, делённое на молекулярную массу);

K_1 и K_2 – коэффициенты пропорциональности;

K_w – ионное произведение воды. При температуре $25\text{ }^{\circ}\text{C}$: $K_w=10^{-14}$;
 $\rho=996\text{ кг/м}^3$; $\mu_{\text{H}_2\text{O}}=18,016\text{ кг/кмоль}$; $C_{\text{H}_2\text{O}}=996/18,016=55,23$.

Тогда $K_1/K_2=10^{-14}/55,23\approx 1,81\cdot 10^{-16}$, т. е. $K_2 \gg K_1$ в 10^{16} раз (диссоциация молекул идёт значительно медленнее ассоциации).

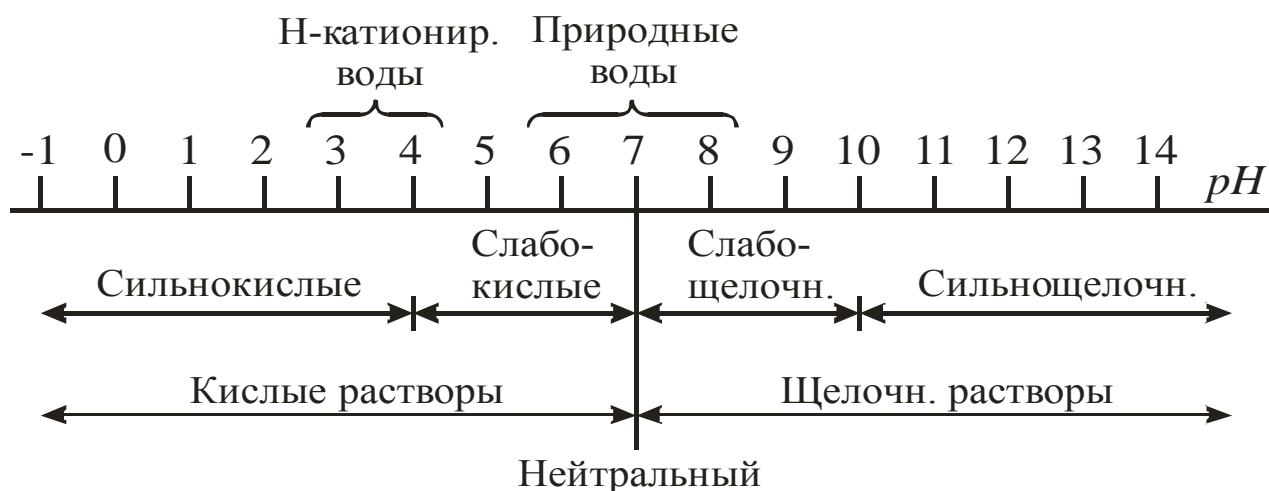
В силу нейтральности: $H^+ : OH^- = 1 : 1$. Если в воде растворить вещества, способные диссоциировать на ионы H^+ или OH^- , то равенство нарушается.

Более удобно пользоваться не концентрациями, а обозначать следующим образом:

$$-\lg C_{H^+} = pH; \quad -\lg C_{OH^-} = pOH.$$

Тогда $\lg C_{H^+} + \lg C_{OH^-} = \lg K_w$ или $pH + pOH = pK_w = 14$.

Соотношение между величинами pH



1.2 Солевой состав воды, примеси

Вода является хорошим растворителем. Молекулы многих веществ в воде диссоциируют как и вода на ионы.

Основные катионы, присутствующие в воде: H^+ , K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Cu^{2+} , Al^{3+} и др.

Основные анионы, присутствующие в воде: Cl^- , OH^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , SiO_3^{2-} , CO_3^{2-} ;

В соответствии с равновесием фаз сумма катионов равна сумме анионов:

$$\sum K = \sum A, \text{ г экв/л.} \quad (1.3)$$

Диаграмма гипотетического состава солей в исходной воде по данным анализа (рисунок 1.1) строится в масштабе.

Например, $\sum K = \sum A = 4,75$ мг экв/л.

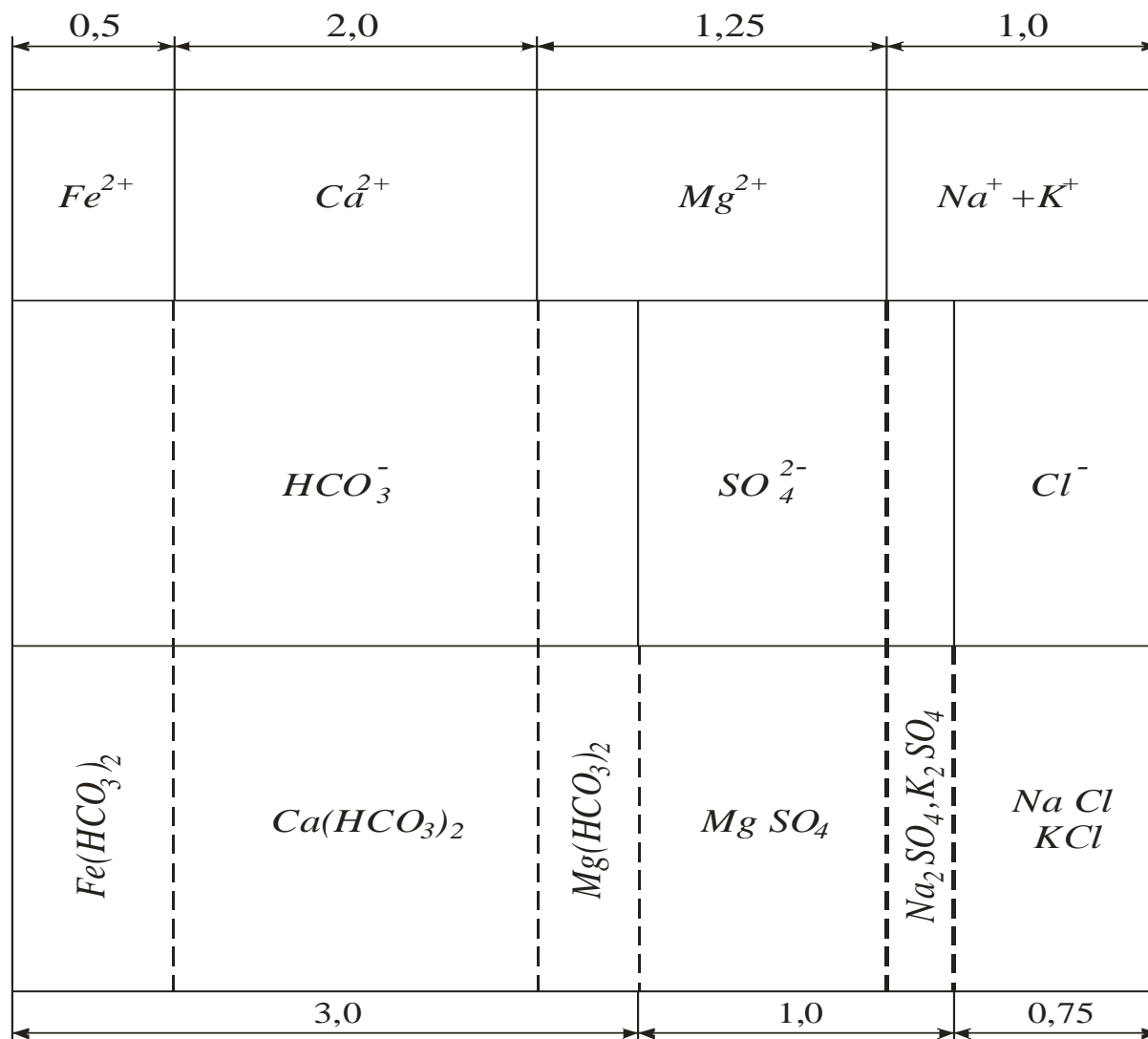


Рисунок 1.1 – Диаграмма гипотетического состава солей в воде

Солесодержание воды характеризуется общей концентрацией в воде катионов $[K^{+}; Na^{+}; Ca^{2+}; Mg^{2+}]$ и анионов $[HCO_3^{-}; SO_4^{2-}; Cl^{-}; SiO_3^{2-}]$ и определяет её степень минерализации в мг/л.

Концентрация веществ, растворённых в воде, измеряется в мг/л или мг/кг (если плотность раствора близка к 1 кг/л, то разницы между этими величинами практически нет, но если раствор значительно отличается по плотности от воды, то точнее измерять в мг/кг).

Для составления балансов и определения концентрации при титровании часто используют эквивалентную концентрацию г экв/л, г экв/м³, мг экв/л, мкг экв/л и т. д. (мг экв – называется количество вещества в мг, численно равное его эквивалентной массе, представляющей собой частное от деления молекулярной массы вещества на валентность в данном соединении).

Например, для H_2SO_4 – $\mu_{H_2SO_4} = 98$ кг/кмоль; $1 \text{ мг экв}(H_2SO_4) = \frac{98}{2} = 49 \text{ мг}$.

Раствор, содержащий 1 г экв вещества в одном литре, называется *нормальным* раствором (1Н).

Разбавленные в 10 и 100 раз растворы называются децинормальным (0,1Н) и сантинормальным (0,01Н).

Физико-химические свойства воды характеризуют следующие показатели: прозрачность, содержание взвешенных веществ, сухой остаток, солесодержание, окисляемость, жесткость, щелочность, концентрация растворённых газов (CO_2 и O_2).

Прозрачность – характеризуется наличием взвешенных механических и коллоидных примесей. Измеряется в см по «кресту» или по «шрифту».

Содержание взвешенных веществ – определяет степень загрязнения воды твёрдыми нерастворимыми примесями. Измеряется в мг/л.

Сухой остаток – остаток после выпаривания пробы, высушенный при 110 – 120 °С. Он содержит коллоидные и растворённые неорганические и органические примеси в воде [мг/кг].

Солесодержание – определяет степень минерализации воды (содержание солей) в мг/л.

Окисляемость – характеризует концентрацию находящихся в воде органических примесей. Определяется по количеству кислорода (мг/л), необходимого для окисления органических примесей, содержащихся в 1 кг воды.

Жесткость воды – является важным показателем качества воды. Характеризуется содержанием ионов кальция и магния [$C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}}$] мг экв/л.

По величине общей жесткости природную воду делят на три группы:

мягкую – с $Ж_0 < 4$ мг экв/кг;

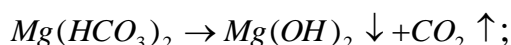
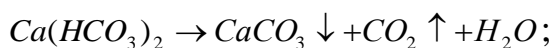
средней жесткости – с $Ж_0 = 4 - 7$ мг экв/кг;

жесткую – с $Ж_0 > 7$ мг экв/кг.

Общая жесткость состоит:

$$Ж_0 = Ж_K + Ж_{НК}, \quad (1.4)$$

где $Ж_K$ – карбонатная жесткость. Карбонатная (временная) жесткость обусловлена бикарбонатами $Ca(HCO_3)_2$ и $Mg(HCO_3)_2$. При кипячении разлагаются с образованием накипи $CaCO_3$ и $Mg(OH)_2$:



$Ж_{НК}$ – некарбонатная жесткость. Некарбонатная (постоянная) жесткость обуславливается наличием всех остальных солей кальция и магния ($CaSO_4$; $MgSO_4$; $CaCl_2$; $MgCl_2$ и др.).

Щелочность воды – характеризуется содержанием бикарбонатных HCO_3^- , карбонатных CO_3^- и гидроксидных OH^- ионов.

В природных водах щелочность обуславливается в основном наличием HCO_3^- . Кроме того, так как вода для подпитки берётся из рек, озёр, водохранилищ и т. п., то в ней содержатся *механические* примеси в виде взвешенных частиц (песок, глина, ил и т. п.) и *коллоидные* примеси (продукты распада

микроорганизмов и растительности), а также растворённые газы (кислород и углекислый газ).

Растворённые в воде газы разделяются на две категории:

- а) химически взаимодействующие с водой и присутствующими в ней веществами (NH_3 , CO_2 и др.);
- б) химически не взаимодействующие с водой и её примесями (N_2 , H_2 , O_2).

Растворимость химически не взаимодействующих с водой газов определяется законом Генри:

$$g_i = a_2 \cdot p_i, \quad (1.5)$$

где a_2 – коэффициент абсорбции;

p_i – парциальное давление рассматриваемого i -го газа над жидкостью.

Парциальным давлением называют давление i -го газа, как если бы он один занимал весь объём смеси при той же температуре.

Смесь газов подчиняется закону Дальтона: $P_{см} = \sum_{i=1}^{i=n} P_i$.

Парциальное давление можно определить из уравнения Менделеева-Клапейрона на 1 кг воздуха:

$$P_i = \frac{C_i RT}{M_i U_i}, \quad (1.6)$$

где C_i – концентрация рассматриваемого газа (г/кг воздуха);

R – газовая постоянная (0,082 л бар / (моль К));

U_i – удельный объём газа л/кг;

M_i – молекулярная масса газа;

T – абсолютная температура.

(При нагревании воды увеличивается концентрация водяных паров и соответственно их парциальное давление. Парциальное давление O_2 и CO_2 понижается и снижается их растворимость).

1.3 Влияние примесей на работу котла. Механизм образования накипи

1.3.1 Нормы качества питательной и подпиточной воды

Как уже отмечалось, одной из основных задач безопасной эксплуатации котельных установок является организация рационального водного режима, при котором осуществляется безнакипный режим, отсутствует коррозия поверхностей нагрева и обеспечивается требуемое потребителем качество вырабатываемого пара. Пар возвращается от потребителя в конденсированном состоянии в меньшем количестве, чем количество вырабатываемого пара. Величина потерь пара зависит от характера производства.

Например:

в машиностроении – до 20 %;

в промышленности стройматериалов – до 30 %;

в химической – до 40 %;

в нефтеперерабатывающей – до 50 %;

в отопительных котельных – от 10 до 100 %.

Кроме того: утечки в теплотрассах составляют 0,5 – 1 %; с продувкой – 5 – 10 %.

Эти потери восполняются за счет добавки воды, прошедшей обработку.

Добавочной водой называют воду, прошедшую подготовку.

Питательной водой называется смесь добавочной воды и возвращаемого конденсата.

Котловой водой называется вода, циркулирующая в контуре котла.

При работе котлоагрегата происходит непрерывное накопление примесей в котловой воде вследствие её упаривания и притока солей с питательной

водой. Эти примеси могут загрязнять пар (соли кремниевой кислоты растворяются в паре при высоких давлениях, а затем отлагаются на стенках аппаратов при снижении давления). Оставшиеся примеси в котловой воде вызывают отрицательные последствия, если не принять соответствующих мер при обработке воды.

Попадание механических примесей и солей карбонатной жесткости вызывают образование в испарительном контуре *шламов и рыхлых соединений*, которые необходимо периодически удалять. Теплопроводность накипи и шлама незначительна по сравнению с теплопроводностью металлических стенок. Поэтому увеличивается термическое сопротивление процессу теплопередачи от газов к воде, что приводит к недопустимому повышению температуры стенок труб и снижению их механической прочности.

Увеличение термического сопротивления повышает расход топлива. Наибольшее накипеобразование происходит в зоне высоких температур (на огневой стороне).

Растворённые в воде газы (CO_2 и O_2) при высоких температурах обладают большой коррозионной активностью.

Щелочность воды несколько снижает интенсивность коррозионных процессов, но с увеличением щелочности увеличивается вспенивание воды в барабанах, и возможен унос пены с паром.

Присутствие в воде органических соединений также нежелательно. Высокая окисляемость воды затрудняет её обработку и удаление минеральных солей, повышает пенообразование.

Следовательно, к качеству питательной воды предъявляются требования в зависимости:

- 1) от типа котлоагрегата (барабанный (с многократной циркуляцией); прямоточный; водогрейный);
- 2) от вида сжигаемого топлива (различные теплонапряжения);
- 3) от давления вырабатываемого пара.

Требования к питательной воде паровых котлов.

Для котлов с естественной циркуляцией с паропроизводительностью 0,7 т/ч и выше, с $P_{раб} < 4,0$ МПа (39 кгс/см²) должны удовлетворять следующим нормам:

а) J_o (не более):

- для газотрубных и жаротрубных котлов, работающих на твёрдом топливе – 500 мкг экв/кг;

- для газотрубных и жаротрубных котлов, работающих на газообразном или жидком топливе – 30 мкг экв/кг;

- для водотрубных котлов с рабочим давлением до 1,4 МПа (13 кгс/см²) – 20 мкг экв/кг;

- для водотрубных котлов с $P_{раб}$ от 1,4 до 4,0 МПа (от 13 до 39 кгс/см²) – 15 мкг экв/кг;

б) содержание растворённого кислорода (не более):

- для котлов с $P_{раб} < 4,0$ МПа (39 кгс/см²) и паропроизводительностью 2 т/ч и более, не имеющих экономайзеров, и котлов с чугунными экономайзерами – 100 мкг/кг;

- для котлов с $P_{раб} < 4,0$ МПа (39 кгс/см²) и паропроизводительностью 2 т/ч и более со стальными экономайзерами – 30 мкг/кг;

в) содержание масел (не более):

- для котлов с $P_{раб} < 1,4$ МПа (13 кгс/см²) – 5 мг/кг;

- для котлов $13 < P_{раб} < 39$ кгс/см² – 3 мг/кг.

Для котлов с естественной циркуляцией с $P_{раб} < 4,0$ МПа (39 кгс/см²), а также для прямоточных котлов не зависимо от давления качество питательной воды должно удовлетворять ПТЭЭСиС.

Нормы солесодержания и щелочности котловой воды устанавливаются на основе испытаний. Относительная щелочность не должна превышать 20 %,

$$\text{Щ}_{\text{относ.}} = 40 \frac{\text{Щ}_o}{A_{\text{с.о.}}} 100 \%, \text{ (в пересчете на NaOH).} \quad (1.7)$$

В паровых котлах со сварными барабанами запускается повышение относительной щелочности сверх допустимой нормы до 50 % при условии принятия мер по предупреждению межкристалльной коррозии металла.

Качество подпиточной воды для водогрейных котлов:

- а) карбонатная жесткость – не более 700 мкг экв/кг;
- б) содержание растворённого кислорода – не более 50 мкг экв/кг;
- в) содержание взвешенных веществ – не более 5 мг/кг;
- г) содержание свободной углекислоты не допускается;
- д) *pH* не менее 7.

1.3.2 Механизм образования накипи

При выпадении в осадок труднорастворимого вещества устанавливается динамическое равновесие между осадком и раствором. Оно характеризуется постоянством концентрации этого вещества в растворе при данной температуре.

Произведение активностей ионов называется *произведением растворимости*.

Произведение растворимости для бинарных электролитов (*КА*):

$$\text{ПР}_1 = a_{\text{к}} \cdot a_{\text{А}} = f_1^2 \cdot C_{\text{к}} \cdot C_{\text{А}}, \quad (1.8)$$

где $a_{\text{к}}$, $a_{\text{А}}$ – активности ионов;

f_1 – коэффициент активности однозарядных ионов;

$C_{\text{к}}$, $C_{\text{А}}$ – концентрации ионов.

Растворимость (*КА*):

$$S_1 = C_k = C_A = \frac{1}{f_1} \sqrt{PP_1}. \quad (1.9)$$

Коэффициент активности f_i зависит не только от концентрации данного иона C_i , но и от концентрации других ионов, находящихся в растворе. Влияние на f_i всех ионов характеризуется ионной силой раствора:

$$\mu_i = \frac{1}{2} (C_1 Z_1^2 + C_2 Z_2^2 + \dots + C_n Z_n^2), \quad (1.10)$$

где Z – валентность иона.

Согласно уравнению Дебая-Гюккеля

$$\lg f_i = \frac{A \cdot Z_i^2 \cdot \sqrt{\mu}}{1 + \sqrt{\mu}}, \quad (1.11)$$

для разбавленных растворов: $\lg f_i = -0.5 \cdot Z_i^2 \cdot \sqrt{\mu}$;

для большинства природных вод: $\mu = \frac{S}{40} \cdot 10^{-3}$,

где A – экспериментальный коэффициент;

S – солесодержание воды, мг/кг.

Произведение растворимости для (K_2A):

$$PP_2 = C_k^2 \cdot C_A \cdot f_1^2 \cdot f_2. \quad (1.12)$$

Растворимость:

$$S_2 = C_A, \text{ тогда } C_k = 2C_A = 2S_2; S_2 = C_A = \sqrt[3]{\frac{PP_2}{4f_1^2 \cdot f_2}}.$$

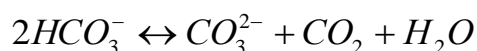
Для веществ типа $K_m A_n$:

$$a_k^m \cdot a_A^n = f_k^m \cdot C_k^m \cdot f_A^n \cdot C_A^n = PP_m;$$

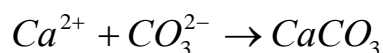
$$S_m = C_{k/m} = C_{A/n}.$$

Твёрдые отложения образуются в результате различных физико-химических процессов, вызываемых нагреванием и упариванием воды. Практика эксплуатации показывает, что основными накипеобразователями являются нерастворимые соединения кальция и магния: $CaCO_3$, $CaSO_4$, $Mg(OH)_2$.

При недостатке растворённой углекислоты происходит распад бикарбонатов:



и образуется накипь



↓

осадок,

т. е. при нагреве воды выпадает карбонат кальция:



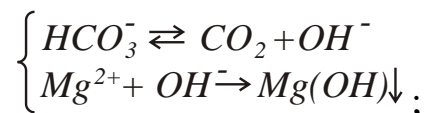
↓

осадок.

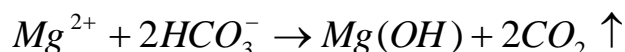
Сернокислый кальций ($CaSO_4$) образуется вследствие понижения его растворимости при повышении температуры воды и увеличения концентрации ионов при упаривании воды.

Гидроокись магния ($Mg(OH)_2$) получается в результате уменьшения растворимости при повышении температуры и в результате образования анионов $(OH)^-$ при разложении HCO_3^- :

по стадиям



в целом



↓

осадок.

Например, PP_{CaCO_3} при $25\text{ }^\circ\text{C}$ – $4,8 \cdot 10^{-9}$; при $95\text{ }^\circ\text{C}$ – $0,83 \cdot 10^{-9}$. Это значит, что при условии полного термического распада бикарбонатов образование $CaCO_3$ происходит и без упаривания котловой воды. PP_{CaSO_4} при $25\text{ }^\circ\text{C}$ – $6,1 \cdot 10^{-5}$; при $95\text{ }^\circ\text{C}$ – $1,08 \cdot 10^{-5}$. То есть $CaSO_4 \cdot nH_2O$ выпадает при достижении некоторой концентрации, если произведение активности ионов Ca^{2+} и SO_4^{2-} превысит величину произведения растворимости.

Слой накипи приводит к уменьшению коэффициента теплопередачи и к повышению температуры наружной поверхности теплообменных труб котлов. В результате трубы прогорают, что приводит к аварии котлоагрегата или к сокращению срока службы, т. к. $\Delta t_{cm} = \frac{Q}{K_\lambda F} = t_{cm} - t_e$ (рисунок 1.2). (Коэффициент теплопередачи – величина, обратная термическому сопротивлению

$K = \frac{1}{\sum R}$). Если считать, что коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 не изменяются, то при образовании накипи увеличивается термическое сопротивление и

уменьшается коэффициент теплопередачи: $R_{cm}^{загр} = \frac{\delta_{cm}}{\lambda_{cm}} + \frac{\delta_{загр}}{\lambda_{загр}}$.

1.3.3 Практические примеры

1. Показать увеличение температуры стенки трубы при наличии толщины слоя накипи до 1 мм.

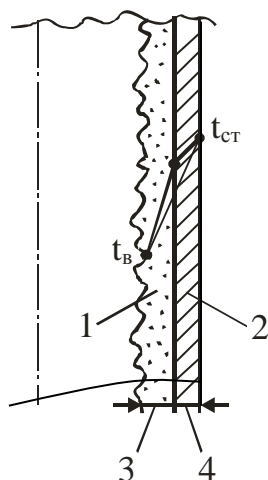
Для незагрязнённой стенки:

$$R_{cn} = \frac{2,5 \cdot 10^{-3}}{20} = 0,125 \cdot 10^{-3}, \quad \frac{m^2 \cdot K}{Вт}$$

Для загрязнённой стенки (толщина отложения 1 мм):

$$R_{cn}^{загр} = 0,125 \cdot 10^{-3} + \frac{1 \cdot 10^{-3}}{0,05} = 20,125 \cdot 10^{-3}.$$

Снижение K приводит к увеличению потерь и увеличению температуры стенки $t_{ст}$.



- 1 – накипь;
- 2 – стенка трубы;
- 3 – средняя толщина слоя накипи $\delta_{загр}$;
- 4 – толщина стенки трубы $\delta_{ст}$

Рисунок 1.2 – Влияние слоя накипи на температуру стенки трубы

2. Обратная система охлаждения конденсаторов турбин электростанций должна подпитываться водой следующего состава, мг экв/л:

$$C_{Ca^{2+}} = 10; \quad C_{Mg^{2+}} = 2,5; \quad C_{Na^+} = 3; \quad C_{SO_4^{2-}} = 8; \quad C_{Cl^-} = 2,5; \quad C_{HCO_3^-} = 5.$$

Система будет работать с коэффициентом упаривания $K_y=1,7$, температура воды 298 К. Для предотвращения накипобразования добавляемую воду предлагается обрабатывать H_2SO_4 , понижая щелочность с 5 до 2 мг экв/л. Определить, будет ли выпадать в системе гипс?

Решение: Ионная сила подпиточной воды равна:

$$\mu = 0,5 \cdot 10^{-3} (C_{SO_4^{2-}} \cdot Z_{SO_4^{2-}}^2 + C_{Ca^{2+}} \cdot Z_{Ca^{2+}}^2 + C_{Mg^{2+}} \cdot Z_{Mg^{2+}}^2) + 0,5 \cdot 10^{-3} (C_{Na^+} \cdot Z_{Na^+}^2 + C_{HCO_3^-} \cdot Z_{HCO_3^-}^2 + C_{Cl^-} \cdot Z_{Cl^-}^2).$$

После упаривания концентрации в г-ион/л:

$$C_{Ca^{2+}} = 10 \cdot 0,5 \cdot 1,7 \cdot 10^{-3} = 8,5 \cdot 10^{-3};$$

$$C_{SO_4^{2-}} = (8 + 3) \cdot 0,5 \cdot 1,7 \cdot 10^{-3} = 9,35 \cdot 10^{-3};$$

$$C_{Mg^{2+}} = 2,5 \cdot 0,5 \cdot 1,7 \cdot 10^{-3} = 2,13 \cdot 10^{-3};$$

$$C_{Na^+} = 3 \cdot 1,7 \cdot 10^{-3} = 5,1 \cdot 10^{-3};$$

$$C_{Cl^-} = 2,5 \cdot 1,7 \cdot 10^{-3} = 4,25 \cdot 10^{-3};$$

$$C_{HCO_3^-} = 2 \cdot 1,7 \cdot 10^{-3} = 3,4 \cdot 10^{-3}.$$

$$\mu = 0,5 \cdot 10^{-3} (2^2 \cdot (8,5 + 9,35 + 2,13) + 1^2 \cdot (5,1 + 4,25 + 3,4)) = 4,63 \cdot 10^{-2}.$$

Значение коэффициента активности $f_2=0,46$.

$$\text{Тогда } f_2^2 \cdot C_{Ca^{2+}} \cdot C_{SO_4^{2-}} = 0,46^2 \cdot 8,5 \cdot 9,35 \cdot 10^{-6} = 0,18 \cdot 10^{-5} < PP_{CaSO_4}$$

$$PP_{CaSO_4} (\text{при } 298 \text{ K}) = 6,1 \cdot 10^{-5}.$$

3) Определить pH 0,1Н раствора HCl при 298 К.

$$\mu = \frac{1}{2} (C_{H^+} \cdot Z_{H^+}^2 + C_{Cl^-} \cdot Z_{Cl^-}^2) = \frac{1}{2} (0,1 \cdot 1^2 + 0,1 \cdot 1^2) = 0,1.$$

$$f_1 = 0,78.$$

$$\text{Тогда } a_{H^+} = f_1 \cdot C_{H^+} = 0,78 \cdot 0,1 = 0,078 \text{ г-ион/л};$$

$$pH = -\lg a_{H^+} = -\lg(0,078) = 1,11.$$

2. ОСВЕТЛЕНИЕ ВОДЫ (ПРЕДОЧИСТКА)

Лекция 2

2.1 Физико-химические основы и технология коагуляции; организация процесса в осветлителях

Крупные взвешенные частицы удаляются отстаиванием, мелкие – фильтрацией. Для фильтрующей загрузки используют песок, мраморную крошку, антрацит, сульфоуголь.

При осаждении тонущих в воде загрязняющих частиц под действием силы тяжести оседают на дно резервуара (отстойника), в котором осветляемая вода находится в состоянии покоя или медленного движения.

Скорость их осаждения зависит от их размеров, плотности и коэффициента сопротивления воды движению частицы.

Для средне- и мелкодисперсных частиц эта скорость с некоторым приближением может определяться формулой Стокса:

$$V = \frac{1}{18} \cdot \frac{(\rho_{\Gamma} - \rho_{\text{ж}}) \cdot g \cdot d_{\text{экв}}^2 \cdot 10^3}{\mu}, \text{ мм/с}, \quad (2.1)$$

где ρ_{Γ} и $\rho_{\text{ж}}$ – плотность соответственно взвешенных частиц и воды, кг/м³;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение свободного падения;

$d_{\text{зМ}}$ – эквивалентный диаметр частицы, м;

μ – коэффициент динамической вязкости воды, н·с/м²

Для удаления коллоидных и органических веществ воду перед фильтрацией обрабатывают коагулянтами, т. е. веществами, которые способствуют укрупнению взвешенных веществ (сернокислое железо $FeCl_3$ и сернокислый алюминий $Al_2(OH)_3$). Эти вещества гидратируются с образованием хлопьев ($Al(OH)_3$ и $Fe(OH)_3$). После этого осадок удаляется в осветлителях.

При использовании городской водопроводной воды операции коагуляции и осветления отпадают.

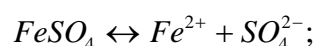
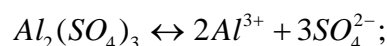
2.1.1 Осветление воды

Осветление воды является первоначальной стадией и имеет целью очистку от взвешенных веществ.

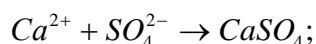
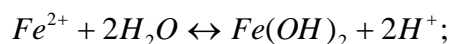
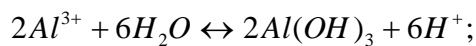
Так как тонкодисперсные и коллоидные частицы плохо поддаются удалению этим способом, то применяют методы *укрупнения* этих частиц.

Для укрупнения частиц применяется *коагуляция* воды. Так как коллоидные частицы, обладая электрическим зарядом, отталкиваются друг от друга, то это препятствует их укрупнению. Коллоидные частицы имеют отрицательный заряд, поэтому вводят искусственные коллоидные системы, имеющие положительный заряд. К таким коллоидам относятся гидраты окислов $Al(OH)_3$ и $Fe(OH)_3$. Для их получения используют сернокислые соли $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ и $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$. Их дозируют в воду в виде растворов, концентрацией 5 – 10 %, при этом протекают реакции:

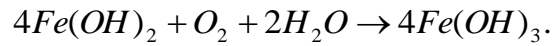
- растворение и электролитическая диссоциация солей:



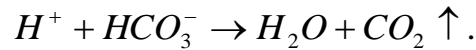
- образование гидратов окислов:



- при взаимодействии с растворённым в воде кислородом гидрат закиси железа переходит в гидрат окиси, выпадающий в виде хлопьев:

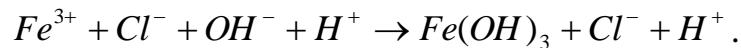


При этом снижается ещё и щелочность за счет разложения бикарбонатов в связи с повышением концентрации ионов H^+ :



Если щелочность воды недостаточна для связывания всех ионов H^+ , образующихся при коагуляции, то воду подщелачивают (едким натром) во избежание получения кислой воды. Солесодержание увеличивается за счет образования Na_2SO_4 .

При использовании $Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$ pH должно быть 6,5 – 7,5, т. к. при pH – более 7,5 образуются растворимые алюминаты. При проведении коагуляции совместно с известкованием ($pH=10$) следует применять только $Fe(SO_4) \cdot 7H_2O$ или $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ (хлорное железо):



Дозировка коагулянта: $Al_2(SO_4)_3$ – обычно 0,5 – 1,2 мг экв/л; $FeSO_4$ – обычно 0,1 – 0,5 мг экв/л. (Уточняется лабораторным путём при наладке).

В последнее время применяют флокулянт полиакриламид (ПАА), который вводится в обрабатываемую воду в виде раствора концентрацией 0,1 – 0,2 %; доза – в пределах 0,5 – 1,5 мг на 100 кг взвешенных веществ.

2.2 Обработка воды осаждением – известкование и реагентное умягчение ВОДЫ

2.2.1 Известкование воды

Известкование основано на связывании ионов, подлежащих удалению в малорастворимые соединения, осаждаемые в виде шлама.

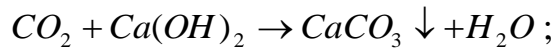
Основным назначением известкования является *удаление из воды связанной или свободной углекислоты, снижение щелочности и сухого остатка с одновременным её умягчением.*

При известковании, совмещенной с коагуляцией, достигается обезжелезивание и частичное обескремнивание (на 30 – 40 %).

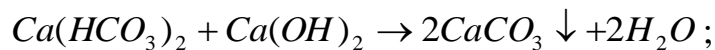
Для более полного удаления кремния (SiO_3^{-2}) (до 0,8 – 1,5 мг/л) с известью дозируется окись магния (MgO).

При известковании воды (добавлении $Ca(OH)_2$) протекают следующие процессы:

а) удаление свободной углекислоты



б) удаление кальциевой карбонатной жесткости



в) удаление магниевой карбонатной жесткости



Дозировка извести устанавливается при наладке в зависимости от исходной воды и требуемого качества обработанной воды. Рекомендуется составлять диаграмму гипотетического состава солей.

Для расчета потребности в извести можно ориентировочно использовать формулы:

если $C_{Ca_{и.в.}} + K \geq C_{HCO_3_{и.в.}} - C_{HCO_3_{ост.}}$, то доза извести

$$D_u = C_{CO_2_{и.в.}} + C_{HCO_3_{и.в.}} - C_{HCO_3_{ост.}} + K, \text{ [мг экв/л]},$$

где K – доза коагулянта, [мг экв/л];

если коагулянт не дозируется в воду ($C_{Ca} \geq C_{HCO_3_{и.в.}} - C_{HCO_3_{ост.}}$), то

$$D_u = C_{CO_2_{и.в.}} + C_{HCO_3_{и.в.}} - C_{HCO_3_{ост.}};$$

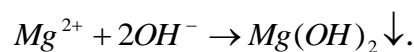
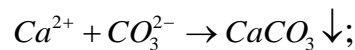
если имеет место условие $C_{Ca_{и.в.}} + K < (C_{HCO_3_{и.в.}} - C_{HCO_3_{ост.}})$, то в воде содержится бикарбонат магния и для его полного осаждения в виде $(Mg(OH)_2)$ необходим избыток извести ($I_u = 0,05 - 0,3$ мг экв/л) и

$$D_u = C_{CO_2_{и.в.}} + 2(C_{HCO_3_{и.в.}} - C_{HCO_3_{ост.}}) - C_{Ca_{и.в.}} + I_u.$$

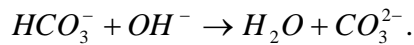
Известь на осаждение коагулянта не используется, достаточно щелочности исходной воды (C_{Ca} со знаком « \leftarrow »).

2.2.2 Содо-известкование воды

Если $J_o > Ш_o$, то применяют содо-известкование (увеличивают в воде содержание анионов CO_3^{2-} и OH^-). При содо-известковании воды (Na_2CO_3 – сода) протекают следующие процессы:



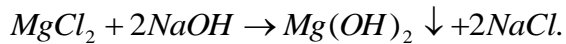
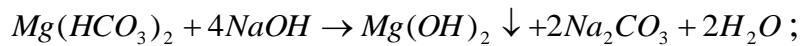
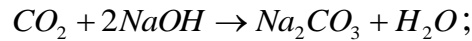
Наличие OH^- приводит к распаду HCO_3^- :



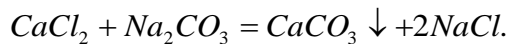
Метод практически не применяется из-за дефицита соды.

2.2.3 Обработка едким натром

При обработке воды едким натром (добавлении NaOH) протекают следующие процессы:



Образующаяся сода идёт на удаление некарбонатной кальциевой жесткости, например:



Умягчение осаждением совмещают с коагуляцией.

Образующиеся в результате реакций хлопья коагулянта и шлама осаждают в осветлителях или фильтрованием.

2.3 Фильтрация воды

А) Фильтры предназначены для механической очистки воды. Конструкции фильтров: безнапорные; напорные. Напорные: 1) однослойные вертикальные; 2) однослойные горизонтальные; 3) двухпоточные (имеют в середине дренаж); 4) многокамерные (в одном вертикальном корпусе несколько параллельных камер).

В котельных применяют напорные однопоточные и двухпоточные фильтры, загруженные дробленным антрацитом или кварцевым песком.

Равномерное распределение воды по площади фильтрования обеспечивается двумя способами:

1. Применением нижних дренажных устройств высокого сопротивления (бесподстилочные, с колпачками или лучевые со щелями);

2. Обеспечением одинакового давления проходящей через фильтр воды при подходе к распределительному устройству (дренажи низкого сопротивления). Равное давление воды создаёт пористая подушка (подстилочный слой) в виде ряда слоёв зернистого материала различной крупности, располагаемых на дренаже и отделяющий его от основной загрузки.

Общая площадь фильтрования:

$$F = \frac{Q \cdot b}{w_{\phi}}, \quad (2.2)$$

где Q – производительность фильтра по осветлённой воде;

$w_{\phi} = 5 - 10$ м/ч – скорость фильтрования;

b – коэффициент собственных нужд осветлённой воды (для 1 – 2 разовой промывки в сутки $b = 1,03 - 1,1$).

Площадь фильтрования каждого фильтра:

$$f = \frac{F}{a-1}, \quad a \geq 2 \text{ штук.} \quad (2.3)$$

Для очистки фильтра производится взрыхляющая промывка. Ее рекомендуется производить осветлённой водой с применением продувки воздухом.

Расход воды на одну промывку:

$$d = \frac{i \cdot 60t \cdot f}{1000}, \quad (2.4)$$

где i – интенсивность промывки (10 – 12 л/(с*м²));

t – продолжительность промывки (~ 20 мин.).

Промывка производится при потере напора 10 – 15 м вод. ст. (0,1 – 0,15 МПа) и зависит от высоты загрузки (0,5 – 1 м) и гранулометрического состава).

Гранулометрический состав определяется по ситовому анализу. Процеивают 100 – 200 г материала через набор сит с разницей калибра 0,25 мм. Остатки на ситах взвешивают, составляют таблицу и строят график (рисунок 2.1), по которому определяют:

- средний диаметр зёрен, соответствующий 50 %-му калибру;
- коэффициент неоднородности:

$$k_n = \frac{d_{80}}{d_{10}}, \quad (2.5)$$

где d_{80} и d_{10} – диаметр 80 % и 10 % калибров.

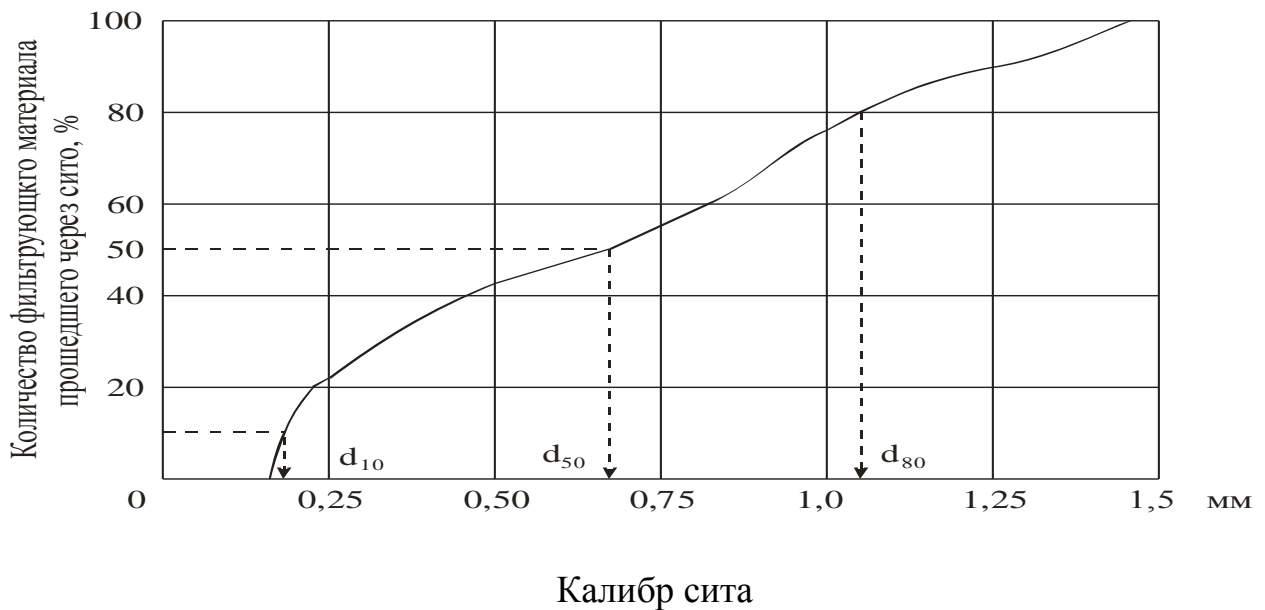


Рисунок 2.1 – График гранулометрического состава

Рекомендуется $d_{50} = 0,5 - 0,8$ мм; $k_n \leq 2$.

Б) Осветлитель предназначен для механической очистки воды от мелкодисперсных частиц после предварительной коагуляции. Из образовавшихся хлопьев формируется взвешенный слой, высота которого может меняться. Взвешенный слой является фильтрующим слоем и, в отличие от фильтра механической очистки с зернистым слоем, осветлитель работает непрерывно, т. к. не требуется промывка фильтрующего слоя. Эта контактная среда имеет громадную поверхность, что создает благоприятные условия для фильтрования.

Конструкция осветлителя дана на рисунке 2.2.

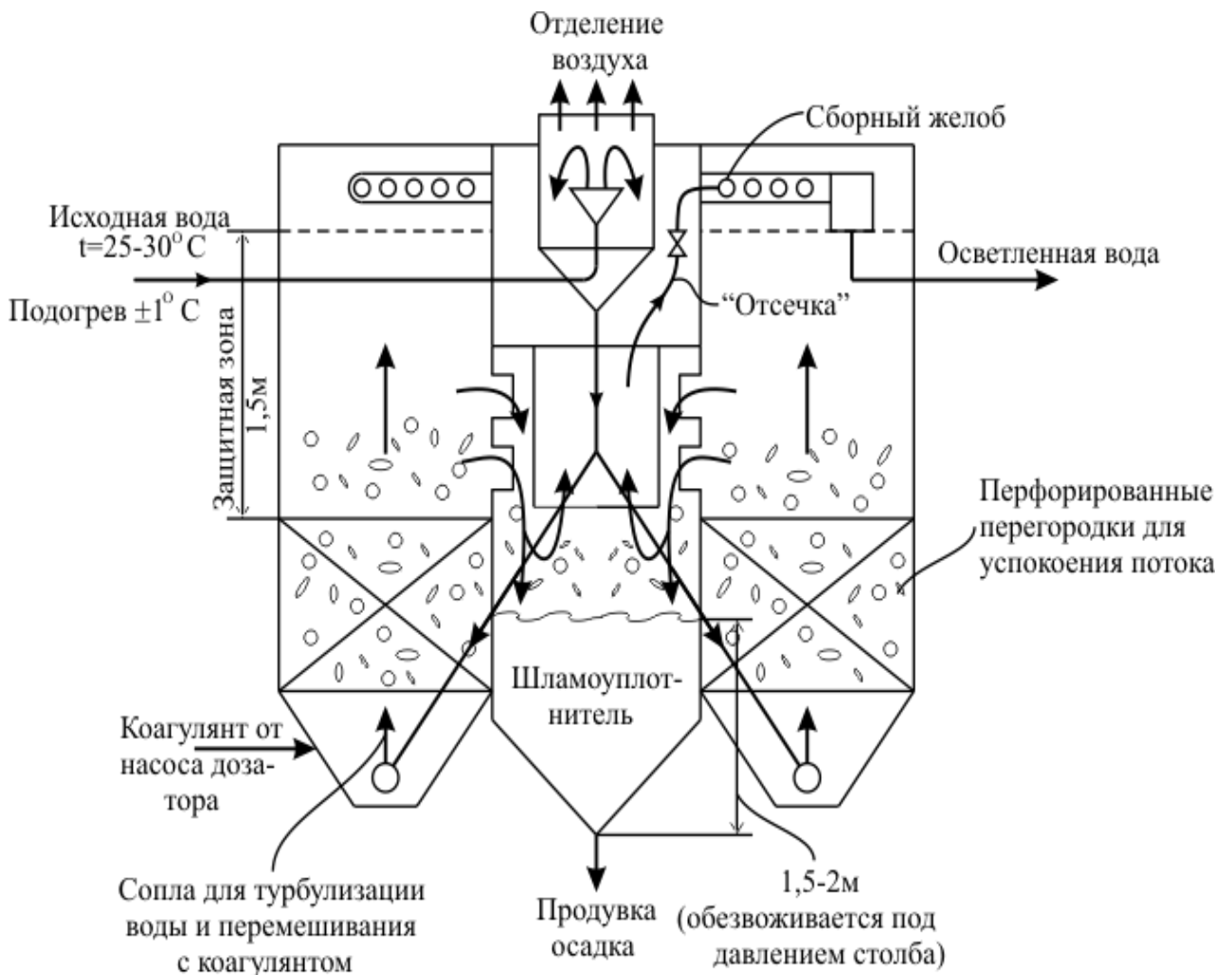


Рисунок 2.2 – Осветлитель ВТИ

3. ОБРАБОТКА ВОДЫ МЕТОДОМ ИОННОГО ОБМЕНА

Лекция 3

3.1 Теория ионного обмена

Рассмотренные методы реагентной обработки воды не позволяют получить воду требуемого качества для работы современных котлов. Следующий этап обработки воды – ионный обмен.

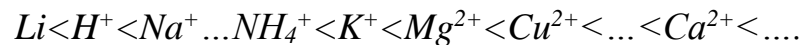
Классификация ионитов: катиониты, аниониты, амфолиты.

По степени диссоциации:

катиониты – сильнокислотные и слабокислотные;

аниониты – сильноосновные и слабоосновные.

Селективность (избирательность) к ионам определяется рядом селективности к ионам. Например, селективность сульфокатионов для разбавленных растворов:



Для анионов:



Обменная ёмкость зависит от поверхности ионита, которая увеличивается при наличии пор, каналов.

Обмен ионов происходит в эквивалентных количествах.

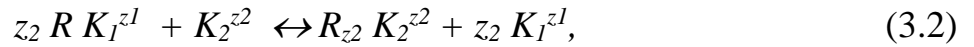
Эквивалентность обмена обусловлена электронейтральностью иона

$$\sum_{i=1}^n Z_i C_i = \sum_{j=1}^m Z_j C_j + \sum_{k=1}^l Z_k C_k. \quad (3.1)$$

Структура молекулы ионита приведена на рисунке 3.1.

Ионный обмен как процесс распределения вещества между твердой и жидкой фазами гетерогенной системы характеризуется равновесием фаз в

сорбционной системе и как для псевдогомогенной системы может быть представлен химической реакцией типа



где R – одновалентная кислотная группа, соединенная с нерастворимым основанием зерна катионита;

K_1, K_2 – обменивающиеся катионы;

z_1, z_2 – заряд (валентность) катионов.

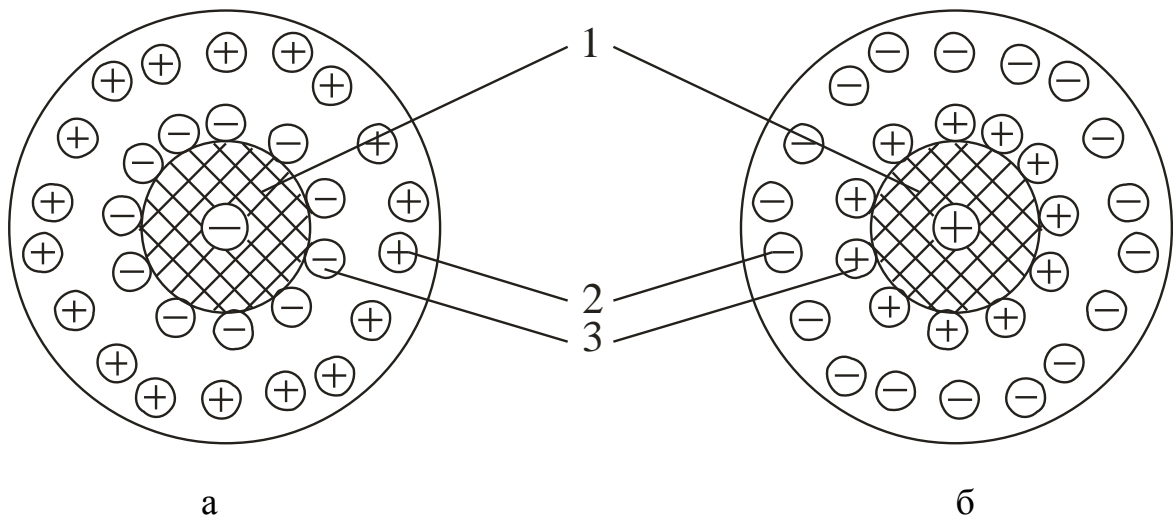


Рисунок 3.1 – Схема структуры молекулы ионита: (а) катионита, (б) анионита

1 – твёрдый многоатомный каркас;

2 – связанные с каркасом неподвижные ионы активных групп: (SO_3 , COO , O);

3 – ограниченно подвижные ионы активных групп, способные к обмену. Например: для катионитов – H^+ , Na^+ , NH_3^+ и др.; для анионитов – OH^- ; Cl^- .

Равновесие устанавливается при определенных концентрациях обменивающихся ионов в растворе и ионите. Для описания ионообменного равновесия предложено несколько теорий, которые можно разделить на неосмотические и осмотические.

В ряде работ используется разработанное Доннаном представление об ионном обмене как мембранном равновесии, когда поверхность зерна рас-

смачивается как мембранная перегородка, проницаемая только для ионов одного знака (разность давлений в системе «ионит – раствор» равна нулю). Уравнение равновесия в этом случае имеет вид (индексы u и p характеризуют ионит и раствор):

$$\frac{(a_1)_u^{1/z_1}}{(a_2)_u^{1/z_2}} = \frac{(a_1)_p^{1/z_1}}{(a_2)_p^{1/z_2}}, \quad (3.3)$$

где a_1, a_2 – активности разноименных ионов.

Наиболее распространенным в настоящее время является представление об ионном обмене как гетерогенной химической реакции двойного обмена, протекающей обратимо в эквивалентных количествах, для описания которой может быть применен закон действующих масс.

На основе термодинамики и статистической механики Б. П. Никольским было выведено уравнение изотермы равновесия для обмена двух ионов любой валентности:

$$\frac{(a_1)_u^{1/z_1}}{(a_2)_u^{1/z_2}} = K \frac{(a_1)_p^{1/z_1}}{(a_2)_p^{1/z_2}}, \quad (3.4)$$

где K – константа равновесия.

Последнее уравнение может быть выражено через концентрации обменивающихся ионов в растворе и ионите:

$$\frac{((c_1)_u f_{1u})^{1/z_1}}{((c_2)_u f_{2u})^{1/z_2}} = K \frac{((c_1)_p f_{1p})^{1/z_1}}{((c_2)_p f_{2p})^{1/z_2}}, \quad (3.5)$$

где $(c_1)_u, (c_2)_u, (c_1)_p, (c_2)_p$ – концентрации поглощенных ионов в ионите и в растворе;

$f_{1u}, f_{1p}, f_{2u}, f_{2p}$ – коэффициенты активности этих ионов в катионите и растворе.

Практическое использование полного уравнения затрудняется отсутствием достоверных данных и методов определения коэффициентов активности поглощенных ионов в твердой фазе (ионите).

Полагая отношение коэффициентов активности в степенях обратных валентности постоянным, Б. П. Никольский предложил упрощенное уравнение изотермы равновесия при ионном обмене, применяемое для практических расчетов технологических процессов ионообменной обработки воды:

$$\frac{((c_1)_u)^{1/z_1}}{((c_2)_u)^{1/z_2}} = \underline{K} \frac{((c_1)_p f_{1p})^{1/z_1}}{((c_2)_p f_{2p})^{1/z_2}}, \quad (3.6)$$

где \underline{K} – кажущаяся константа равновесия.

Входящее в уравнение отношение коэффициентов активности ионов в растворе может быть найдено из известных данных по значению средних коэффициентов активности солей, находящихся в данном растворе при данной ионной силе, что является следствием условия электронейтральности. Например, для случая обмена катионов Ca^{2+} на Na^+ :

$$\frac{f_{Ca}^{1/2}}{f_{Na}^{1/1}} = \frac{\sqrt{f_{Ca}}}{\sqrt{f_{Na}^2}} = \frac{\sqrt{f_{Ca}} f_{Cl}^2}{\sqrt{f_{Na}^2} f_{Cl}^2} = \frac{\sqrt{f_{Ca}} c_{Cl}^3}{\sqrt{f_{Na}} c_{Cl}^4}. \quad (3.7)$$

Различают полную ёмкость и динамическую (рабочую). Ёмкость ионита измеряют в мг экв/л (г экв/м³), мг экв/кг сухого ионита.

При равновесии ионитов с высокой степенью сшивки в растворах электролитов небольшой концентрации влиянием необменно-поглощенных ионов обычно пренебрегают, т. к. их концентрация в ионите весьма мала. По этой же причине указанный фактор не учитывается при изучении технологи-

ческих процессов обработки воды (ионитовое умягчение, обессоливание), имеющей слабую минерализацию. При равновесии катионита, имеющего нормальную степень сшивки (например, КУ-2 с 8 % дивинилбензола (ДВБ)) с растворами высокой концентрации (например, при исследовании технологии ионитового умягчения высокоминерализованных или морских вод), влияние необменно-поглощенных ионов на равновесие ионного обмена становится заметным и должно быть учтено. С точки зрения технологии ионитового умягчения воды не имеет значения характер поглощения ионов фазой ионита, а главным является суммарная концентрация поглощенных ионов (полная емкость поглощения), определяющая эффект всего процесса.

Динамика ионного обмена определяется уравнением баланса, составленного для элементарного объема слоя пористого ионита для изменения концентрации только одного из компонентов раствора за время $\partial\tau$:

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} + \frac{\partial e_i}{\partial \tau} + \frac{\partial(W_x \cdot C_i)}{\partial x} + \frac{\partial(W_y \cdot C_i)}{\partial y} + \frac{\partial(W_z \cdot C_i)}{\partial z} = D_{m,i}(\nabla^2 C_i + \lambda_i \nabla^2 T), \quad (3.8)$$

где C_i и e_i – объемные концентрации i -го компонента в растворе и в объеме слоя ионита;

W_x, W_y, W_z – составляющие вектора линейной скорости раствора внутри пористой среды по осям координат;

$D_{m,i}$ – коэффициент молекулярной диффузии i -го компонента;

λ_i – коэффициент термодиффузии i -го компонента;

T – температура;

∇^2 – оператор Лапласа.

С учетом ряда упрощений (процесс динамики принимается изотермическим ($T=const$); в уравнениях массопереноса коэффициенты диффузии постоянны; подвижная фаза несжимаема и изменением плотности потока с изменением его концентрации можно пренебречь; действительная скорость по-

тока внутри каналов пористой структуры заменяется некоторой средней скоростью; коэффициент молекулярной диффузии заменяется эффективным квазидиффузионным коэффициентом продольного переноса (D_i^*), который учитывает перенос как от молекулярной диффузии, так и возникающий вследствие отклонения реальных скоростей от средней скорости, имеющей статистический характер; направление движения принимается вдоль одной оси с постоянной средней скоростью ($W=const$); скорость реакции ионного обмена значительно превышает скорость диффузии ионов в растворе и ионите) уравнение будет иметь вид:

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} + \frac{\partial e_i}{\partial \tau} + W \frac{\partial C_i}{\partial x} = D_i^* \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2}. \quad (3.9)$$

Сравнительный анализ влияния переноса вещества в колонне за счет продольных эффектов диффузии, определяемых произведением ($D_i^* \frac{\partial^2 C_i}{\partial x^2}$), и переносом вещества с потоком раствора ($W \frac{\partial C_i}{\partial x}$) показывает, что даже при малых скоростях потока продольная диффузия значительно меньше. Тогда:

$$\frac{\partial C_i}{\partial \tau} + \frac{\partial e_i}{\partial \tau} + W \frac{\partial C_i}{\partial x} = 0. \quad (3.10)$$

Одной из основных характеристик работы натрий-катионитовых фильтров при умягчении минерализованных вод является рабочая обменная емкость поглощения катионита в фильтре – E_p , которая также называется динамической обменной емкостью поглощения и учитывает фактическую емкость поглощения катионита в фильтре на момент начала повышения остаточной концентрации поглощаемого иона (Ca^{2+} или Mg^{2+}) в растворе выходящем из фильтра. Это соответствует началу прохождения через нижнее се-

чение фильтра зоны переменной концентрации поглощаемого иона (зоны «работающего» слоя ионита). В процессе натрий-катионитного умягчения раствора в слое катионита образуется зона переменной концентрации поглощаемого иона в катионите и в растворе, которая постепенно стабилизируется, а затем перемещается по высоте слоя катионита без изменений, образуя «стационарный фронт» с постоянной высотой $H_{рф}$.

Для установившегося режима на рисунке 3.2 приведена рабочая схема ионообменной колонны и соответствующие схематичные графики изменения суммарной концентрации ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} по высоте ионообменной колонны в операциях умягчения воды и регенерации катионита, характеризующиеся соотношением Зельдовича с учетом остаточных концентраций ионов:

$$\frac{C_i - C_{ni}}{C_{0i} - C_{ni}} = \frac{e_i - e_{ni}}{e_{0i} - e_{ni}} = \varphi. \quad (3.11)$$

Тогда

$$E_p = E_n \left(1 - 0,5 \frac{H_{рф}}{H_k} \right), \quad \text{г экв} / \text{м}^3 \text{кат.}, \quad (3.12)$$

где E_n – полная емкость поглощения ионита, с учетом необменной (сверхэквивалентной) емкости поглощения:

$$E_n = E_k^H - E_k^y = (\alpha_{кy}^H - \alpha_{кy}^k) \cdot e_k \cdot (1 - \varepsilon) \left(1 - \frac{W_k}{100} \right) \cdot \rho_k \cdot 10^3. \quad (3.13)$$

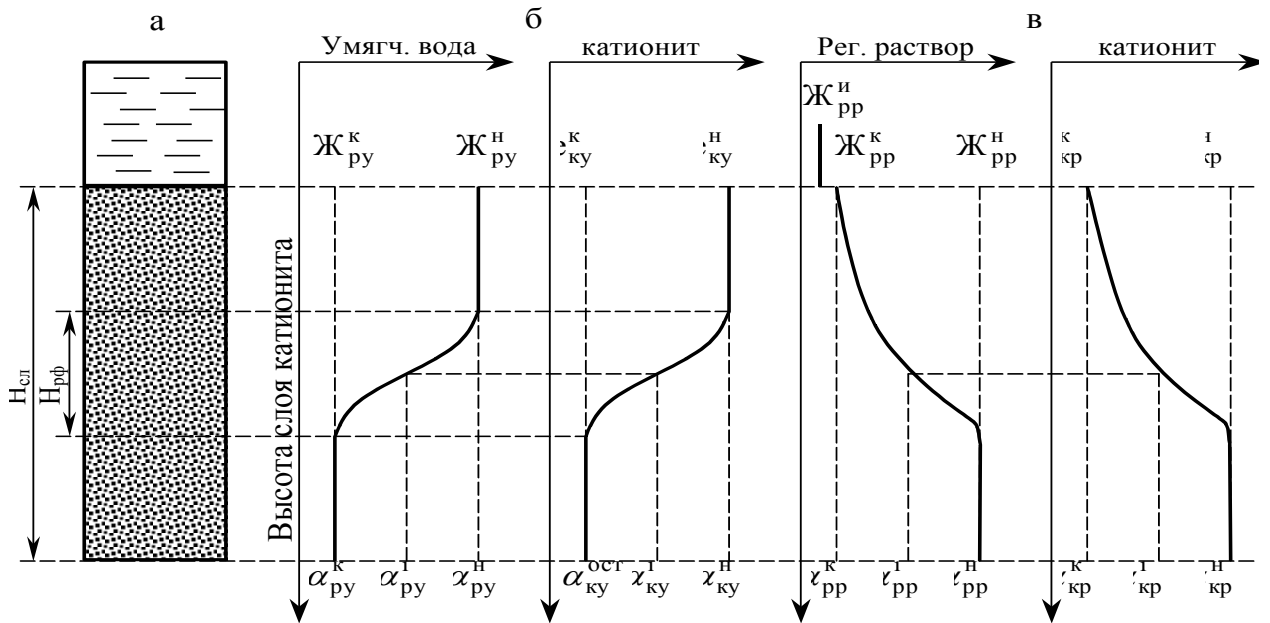


Рисунок 3.2 – Схема ионообменной колонны (а) и графики изменения концентрации обменивающихся ионов в растворе и в слое катионита при операции умягчения воды (б) и при операции регенерации катионита (в).

$H_{сл}$ – высота слоя катионита в колонне, м; $H_{рф}$ – высота «работающего» слоя в процессе умягчения воды, м; $Ж_{ру}^H$ – начальная жесткость исходной минерализованной воды на входе в ионообменную колонку мг экв/л; $Ж_{ру}^K$ – конечная остаточная жесткость умягченной воды на выходе из ионообменной колонны мг экв/л; $e_{ку}^H$ – концентрация ионов жесткости (Ca^{2+} , Mg^{2+}) в катионите, равновесном с исходной минерализованной водой, мг экв/г с. к.; $e_{ку}^K$ – концентрация ионов жесткости (Ca^{2+} , Mg^{2+}) в катионите, равновесном с умягченной водой, мг экв/г с. к.; $Ж_{рр}^H$ – жесткость регенерационного раствора, равновесного с «истощенным» после операции умягчения воды катионитом, мг экв/л; $Ж_{рр}^K$ – жесткость регенерационного раствора в конце процесса регенерации, мг экв/л; $e_{кр}^H$ – концентрация ионов жесткости (Ca^{2+} , Mg^{2+}) в катионите, равновесном с «отработанным» регенерационным раствором, мг экв/г с. к.; $e_{кр}^K$ – концентрация ионов жесткости (Ca^{2+} , Mg^{2+}) в катионите, равновесном с регенерационным раствором в конце процесса регенерации, мг экв/г с. к.

Рабочую обменную способность ионита в практических расчетах определяют по формуле:

$$E_p = \alpha_3 \cdot \beta_{Na} \cdot E_n - 0,5qЖ_o, \quad (3.13)$$

где α_3 – коэффициент эффективности регенерации;

β_{Na} – коэффициент, учитывающий снижение обменной способности вследствие противоионного эффекта;

C_{Na} – концентрация натрия в исходной воде;

\mathcal{J}_o – жесткость общая исходной воды;

E_n – полная обменная способность катионита;

q – удельный расход воды на отмывку.

Лекция 4

3.2 Технология ионного обмена

Работа фильтра включает четыре операции:

основная – ионообменная обработка воды;

вспомогательная – взрыхление; регенерация; отмывка ионита.

Если рассматривать последовательно стадии обработки воды на колонке отрегенированного ионита (рисунок 3.3), то получим картину распределения ионов, которая может быть проиллюстрирована выходной кривой истощения фильтра (рисунок 3.4).

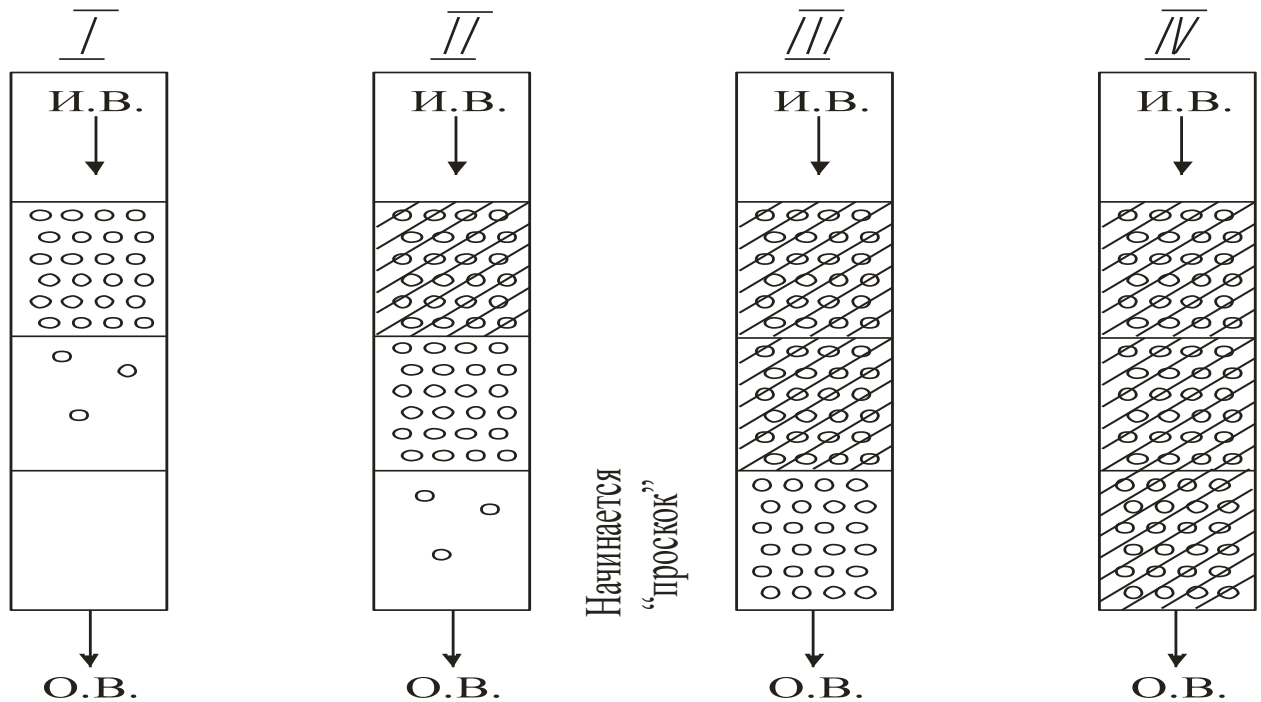


Рисунок 3.3 – Распределение ионов в колонке отрегенированного ионита

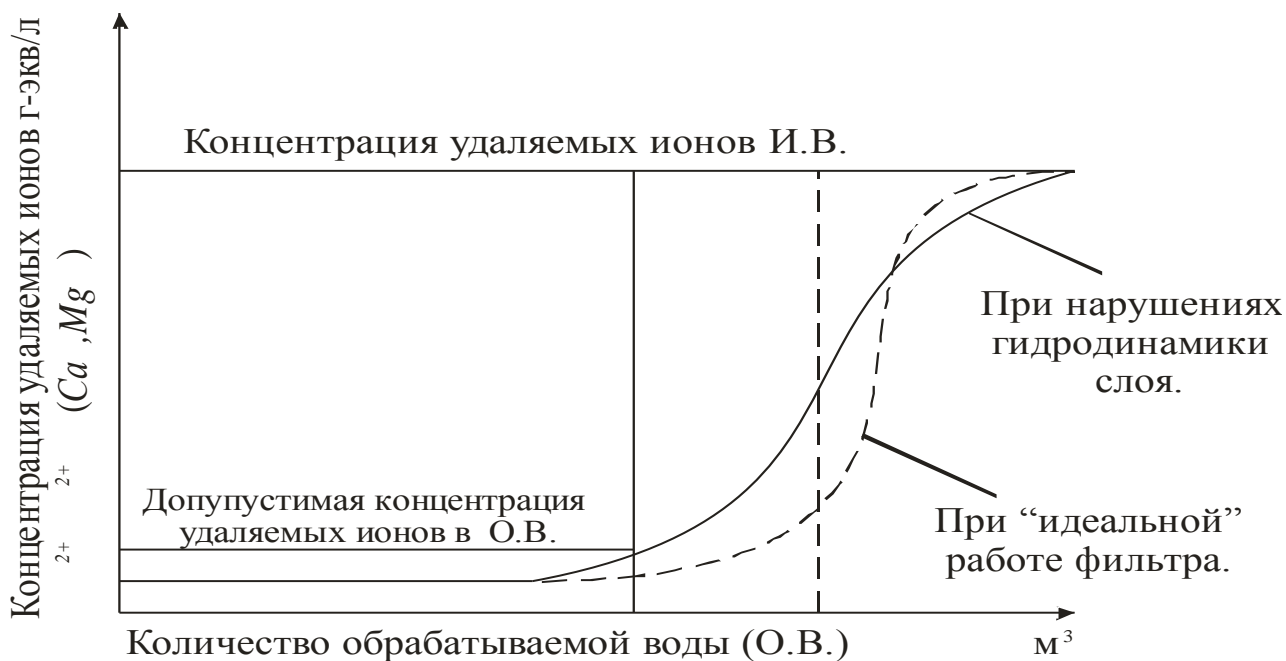


Рисунок 3.4 – Выходная кривая истощения колонки

Причины нарушения гидродинамики слоя:

- 1) пристенный эффект (устраняется при скорости ионирования не менее 5 м/ч);
- 2) перекося «фронта», вызываемый слёживаемостью ионита, рисунок 3.5 (устраняются подвзрыхлением);
- 3) некачественный монтаж или изготовление верхнего распределительного устройства и нижнего дренажа или их поломка.



(Проскок «жесткости» в обработанную воду может наблюдаться при неисправной арматуре)

Рисунок 3.5 – Схема перекося «фронта» ионного обмена в фильтре

Применение двухступенчатой обработки позволяет улучшить качество воды; упростить контроль за качеством; полнее использовать первую ступень.

Прочность ионитов. На прочность ионитов оказывают влияние *механическое истирание, осмотическое давление* (процессы ионного обмена, регенерации, отмывки) и *химическое разрушение*. Износ ионитов приведен в таблицах 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1 – Усреднённый годовой расход ионитов в %

Ионит	На досыпку		На периодическую замену с учетом срока службы	Общий годовой
	В 1-й год	В последующие годы		
1. Сульфуголь водоподготовка	20	12	-	12
2. Катионит КУ – 2	15	10	-	10
3. Анионит АН – 31:				
с удовлетворительной осмотической прочностью	15	8	16	24
с пониженной осмотической прочностью	-	30	-	30
4. Анионит АВ-17-8	13	6	14	20

Таблица 3.2 – Ориентировочный срок службы анионитов в ВПУ

Анионит	Объём фильтрата, тыс. м ³ , получаемого с 1 м ³	Срок службы, лет
АН – 31	180	6 ($H_{cl}=1,7$ м; $w_{\phi}=10$ м/ч)
АВ-17-8 и АВ-27	200	7

Характеристики ионитов:

насыпная масса: товарный катионит γ т/м³, набухший в воде (влажность 50 – 60 %) γ_1 т/м³, набухший в воде материал γ_2 т/м³;

масса сухого ионита (влажность 0 %) в 1 м^3 ;

коэффициент набухания сухого катионита (влажность 0 %):

$$K_c = \frac{\gamma_1}{\gamma_2}; \quad (3.14)$$

коэффициент набухания товарного ионита при заполнении водой:

$$K_T = \frac{\gamma_1}{\gamma}. \quad (3.15)$$

При переходе из одной формы в другую также изменяется насыпная масса.

Пример расчета засыпки фильтра

Определить количество необходимого товарного сульфогля для фильтра $\varnothing 2,0$ м и высотой загрузки после набухания 2,5 м.

Площадь фильтрования:

$$F = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3,14}{4} \cdot 2^2 = 3,1 \text{ м}^2.$$

Коэффициент набухания товарного катионита $k_T = 1,3$.

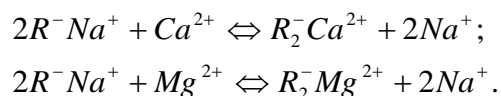
$$Q_T = \frac{F \cdot h \cdot \gamma}{k_T} = \frac{3,1 \cdot 2,5 \cdot 0,65}{1,3} = 4 \text{ т.}$$

Фильтры загружаются не более чем на $2/3$ высоты (катионитные) и на 50 % – анионитные.

3.2.1 Умягчение (Na-катионирование) воды

Умягчением называется ионообменная обработка воды, при которой ионы «жесткости» Ca^{2+} и Mg^{2+} заменяются на ионы Na^+ , соли которого имеют высокую растворимость.

Обозначив фиксированный ион с матрицей у катионита R^- , запишем основные реакции при Na -катионировании:



Щелочность воды при этом не меняется, общее солесодержание увеличивается.

После замещения всех обменных ионов процесс умягчения прекращается. Необходима регенерация катионита.

Время работы фильтра определяется по формуле:

$$T = \frac{e_p \cdot h_k \cdot f}{w \cdot \mathcal{J}_{u.в.}} = \frac{e_p \cdot V_k}{w \cdot \mathcal{J}_{u.в.}}, \quad (3.16)$$

где e_p – удельная рабочая обменная ёмкость ионита;

V_k – объём загрузки набухшего ионита;

h_k – высота слоя (загрузки) ионита;

f – площадь сечения фильтра;

w – скорость ионирования;

$\mathcal{J}_{u.в.}$ – жесткость исходной воды.

Взрыхлением ионит подготавливается к регенерации: разрушаются уплотнения и «протоки»; удаляется грязь и разрушенный катионит.

Регенерация. При умягчении регенерацию производят 5 – 10 % раствором $NaCl$.

Скорость регенерации 5 – 8 м/ч. (При регенерации сульфогля нежелательны остановки «настаивание». Сульфуголь обладает амфолитными свойствами и может поглощать Cl^- , который потом трудно отмывается).

Качество регенерации обеспечивается начальным состоянием катионита (после истощения), концентрацией регенерационного раствора и его количеством (кратность регенерации); кривая регенерации представлена на рисунке 3.6.

Кратность регенерации:

$$m = \frac{c_p \cdot Q_p}{E_p}, \quad (3.17)$$

где c_p – концентрация регенерации раствора;

Q_p – количество пропущенного регенерационного раствора;

$E_p = e_p V_k$ – рабочая обменная ёмкость загрузки фильтра.

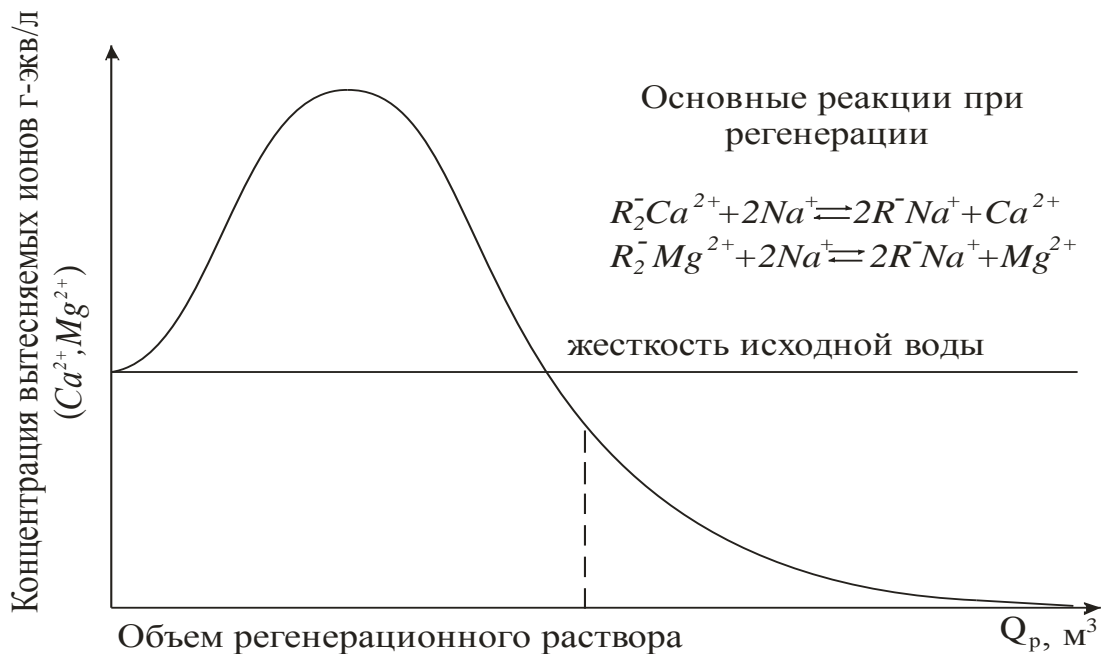


Рисунок 3.6 – Выходная кривая регенерации ионита

Для более полной регенерации нижних слоёв ионита необходимо пропускать большее количество регенерационного раствора. Однако это экономически не выгодно, т. к. стоимость реагентов является основной статьёй эксплуатационных расходов химводоочистки (ХВО). Кроме того, по мере

увеличения расхода соли заметный вначале эффект прироста ёмкости ионита постепенно снижается. Поэтому ограничиваются пропуском соли, обессоливающим требуемое качество обработанной воды (качество регенерации нижних слоёв ионита). В зависимости от исходной воды рекомендуется для паровых котлов с давлением до 4 МПа следующие нормы качества питательной воды:

общая жесткость – 5 – 20 мкг/кг. Такое качество питательной воды обеспечивается для большинства типов природных вод при удельном расходе $NaCl$ $g_c=(250 - 300 \text{ г/г экв})$. Эффективность регенерации ($\alpha_r = \frac{E_p}{E_n}$) при этом составляет – 0,87;

одноступенчатое Na – катионирование применяется для уменьшения общей жесткости до 0,1 мг экв/л, двухступенчатое – ниже 0,1 мг экв/л при карбонатной жесткости менее 3,5 мг экв/л;

одноступенчатое Na – катионирование не позволяет снизить общую жесткость ниже 100 мг экв/л, если жесткость исходной воды более 7 мг экв/л. Поэтому чаще для глубокого умягчения применяется двухступенчатое Na – катионирование;

удельный расход $NaCl$ на регенерацию сульфогля г/г экв, при двухступенчатом Na – катионировании и жесткости обрабатываемой воды, мг экв/л приведен в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Нормы расхода соли на регенерацию

Показатель, мг экв/л	Фильтр первой ступени, г/г экв	Фильтр второй ступени, г/г экв
$J_o \leq 5$	100 – 120	300 – 400
$5 < J_o \leq 10$	120 – 200	
$10 < J_o \leq 15$	170 – 120	
$15 < J_o \leq 20$	200 - 300	

После *Na*-катионирования могут применяться коррекционные методы обработки воды:

нитратирование – для предупреждения межкристаллитной коррозии металла;

фосфатирование или трилонирование – для защиты от накипных отложений поверхностей нагрева котлов с давлением пара более 1,4 МПа.

Число регенераций в сутки определяется формулой:

$$n = \frac{24J_o \cdot Q}{F_k \cdot h_k \cdot E_p} \leq 3, \quad (3.18)$$

где $24J_oQ$ – количество солей в г экв/сут;

J_o – общая жесткость исходной воды;

Q – расход обрабатываемой воды.

Для небольших ВПУ с $Q < 50$ т/ч, работающих по схеме фильтрования – двухступенчатое *Na*-катионирование – важно выбрать диаметр, число фильтров и вид катионита (сульфоуголь или КУ-2) таким образом, чтобы в вечерние и ночные смены отсутствовала необходимость дежурства операторов для производства регенерации. Указанная возможность имеется, если $J_o \leq 5,0$ мг экв/кг.

Площадь фильтрования одного из двух (или трёх) фильтров F_k выбирается тогда из условий:

$$F_k \geq \frac{24J_o \cdot Q}{h_k \cdot E_p} \text{ и } \frac{Q}{5} > F_k > \frac{Q}{15}. \quad (3.19)$$

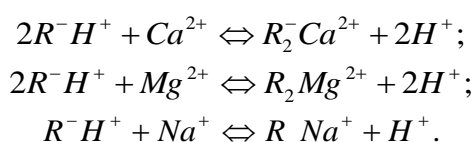
Это позволяет при увеличении капитальных затрат на 5 – 10 % сократить численность операторов с 5 человек до 2.

Методы обработки воды устанавливаются по СНиП-11-35-76.

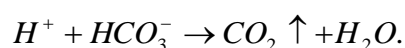
3.2.2 Водород – катионирование

Снизить щелочность воды и понизить общее солесодержание можно, используя водород-катионирование. Осуществить этот процесс можно, если «заряжать» катионит ионом H^+ . Обычно применяют для регенерации раствор H_2SO_4 – как наиболее доступную и дешёвую. Регенерация раствором H_2SO_4 с концентрацией более 1,5 % вызывает «загипсовывание» катионита. Но при низкой концентрации регенерационного раствора невозможно провести качественно регенерацию (низкая ёмкость, плохое качество обработанной воды), поэтому применяют ступенчатую регенерацию растворами с концентрацией 1,5 % – 3 % – 5 %.

Реакции при H -катионитной обработке воды:



В обработанной воде происходит снижение щелочности и солесодержания при разложении бикарбонат иона.



Изменение качества обработанной воды при работе H -катионитного фильтра показано на рисунках 3.7 и 3.8.

Точка (Ж) соответствует исходному состоянию отрегенированного ионита в момент включения (положение I).

До точки (а) идёт полное поглощение всех катионов, и умягченная вода будет иметь кислотность, равную сумме всех катионов, минус щелочность исходной воды. При этом расположение катионов соответствует положению II.

По мере дальнейшего поглощения катионов Ca^{2+} и Mg^{2+} , Na^+ начинает вытесняться в обработанную воду (а – б). И затем фильтр работает в режиме

Na -катионирования (б – в – г), пока не будет весь Na^+ заменён на Ca^{2+} и Mg^{2+} .

Начиная с точки (а), происходит снижение кислотности до нуля (б) и увеличение щелочности до исходной (г).

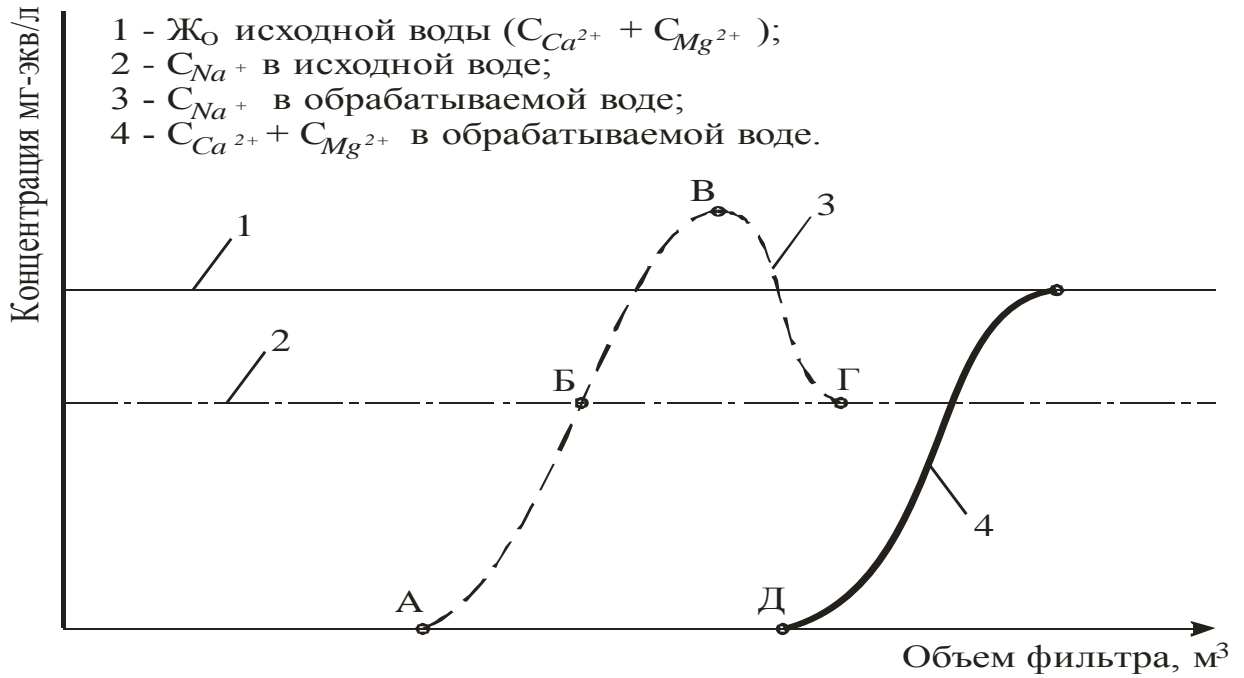


Рисунок 3.7 – Изменение качества обрабатываемой воды при работе H -катионитного фильтра

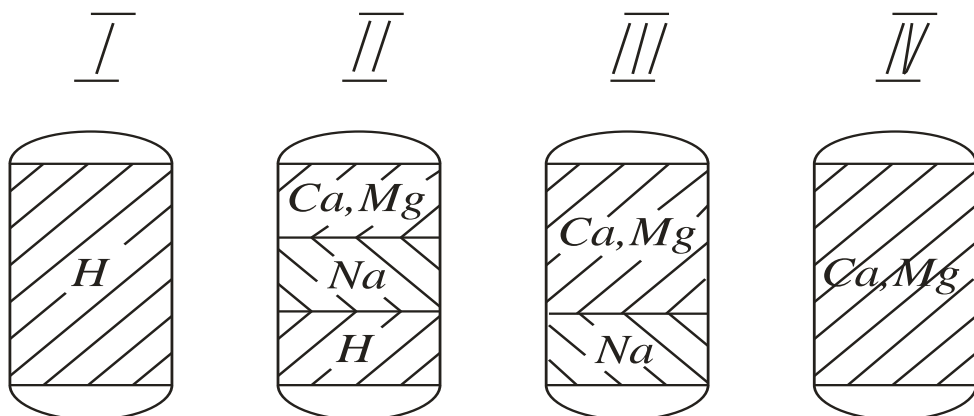


Рисунок 3.8 – Условное расположение катионов в ионите при водород-катионировании воды

3.2.3 Схемы совместного натрий-водород-катионирования

Для корректировки щелочности воды применяется подкисление или совместное H - Na -катионирование.

Иногда применяется частичное разрушение щелочности посредством добавления кислоты в Na -катионированную воду (рисунок 3.9). Образующийся в результате реакции углекислый газ отделяется в декарбонизаторе, а затем вода подается на вторую ступень умягчения. Другим способом корректировки щелочности является подключение к Na -катионитным фильтрам H -катионитных фильтров. Как известно, при работе H -катионитных фильтров наблюдается два периода, сопровождающиеся резким изменением щелочности воды. В первом периоде происходит поглощение всех катионов до проскока ионов Na^+ . Одновременно с этим происходит соединение выделившегося в воду иона H^+ с бикарбонат-ионом HCO_3^- и происходит разрушение бикарбонатной щелочности. Во втором периоде процесс H -катионирования превращается в процесс Na -катионирования за счет ранее поглощенных ионов натрия и щелочность воды восстанавливается.

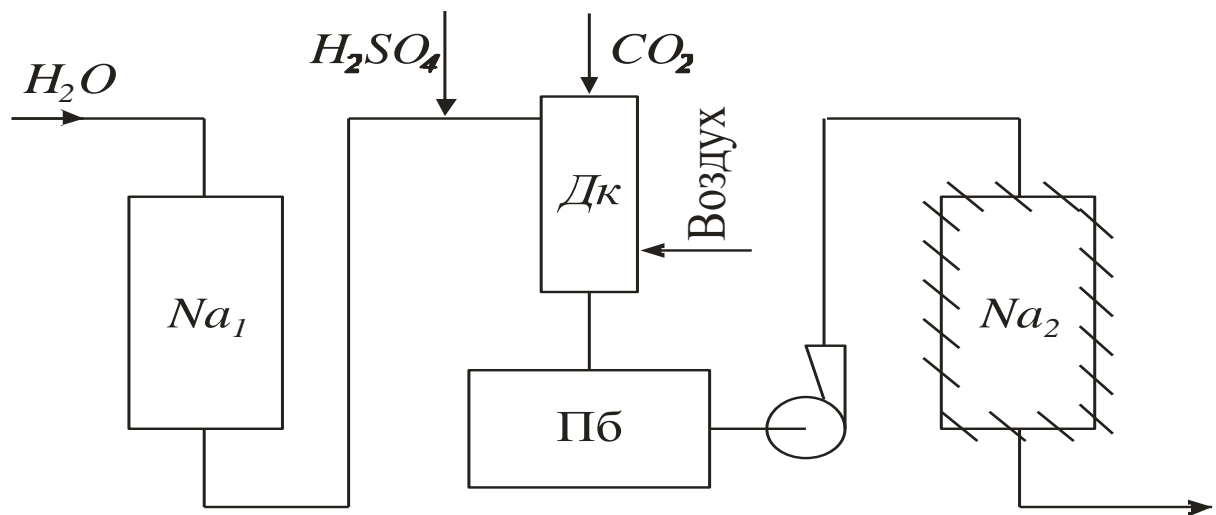


Рисунок 3.9 – Схема двухступенчатого Na -катионирования с подкислением

Na_1 – Na – катионитовый фильтр первой ступени; Na_2 – Na – катионитовый фильтр второй ступени; $Дк$ – декарбонизатор; $Пб$ – промежуточный бак.

Различают следующие схемы совместного *H-Na*-катионирования: параллельное; последовательное (с «голодной» регенерацией *H*-катионитных фильтров); смешанное, которое применяют при различных составах исходной воды (рисунок 3.10).

Параллельное *H-Na*-катионирование применяется при содержании в исходной воде карбонатной жесткости больше половины общей жесткости и суммарной концентрации анионов сильных кислот более 2 мг экв/кг. При этом часть исходной воды подается на *H*-катионитный фильтр, а другая часть – на *Na*-катионитный. Кислая вода после *H*-катионитного фильтра смешивается затем со щелочной водой после *Na*-катионитного фильтра и при этом происходит разрушение щелочности до заданного значения с выделением CO_2 , который удаляется в декарбонизаторе. Затем вода при необходимости доумягчается на *Na*-катионитном фильтре второй ступени. Долю воды, которую необходимо пропустить через *H*-катионитный фильтр, определяют по формуле:

$$x = \frac{C_{HCO_3^-} - Щ_{ост}}{C_{HCO_3^-} + C_{SO_4^{2-}} + C_{Cl^-} + C_{NO_3^-}}, \quad (3.20)$$

где C – концентрация соответствующего аниона;

$Щ_{ост}$ – остаточная щелочность.

При солесодержании выше 1000 мг/кг, содержании карбонатной жесткости менее половины от общей жесткости и при сумме концентраций анионов сильных кислот менее 2 мг экв/кг рекомендуется применять последовательное *H-Na*-катионирование.

H-катионирование с «голодной» регенерацией применяется, когда необходимо разрушение бикарбонатов со снижением только карбонатной жесткости (щелочности) до 0,7 – 1,5 мг экв/л.

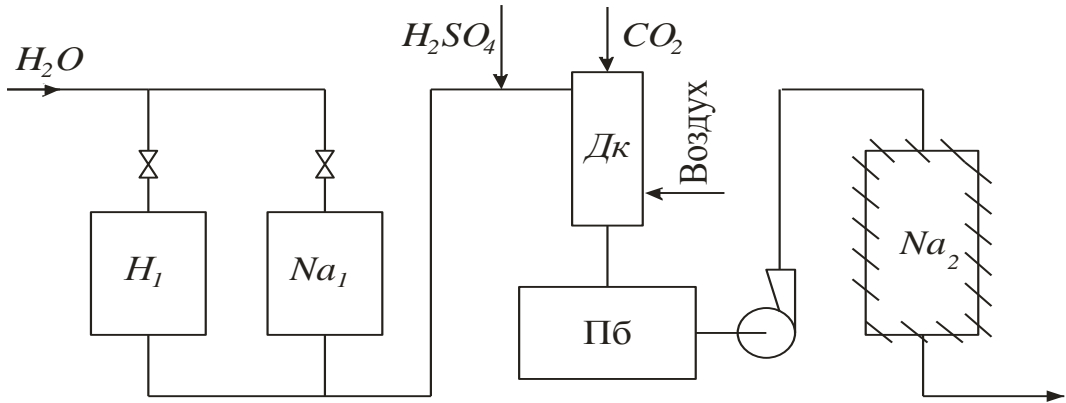
На регенерацию используется теоретическое или меньшее количество кислоты. Тогда в верхних слоях будет ион H^+ , а в нижних остатки Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{2+} . В верхних слоях катионита происходят общие реакции H -катионирования, в результате которых образуются сильные кислоты и угольная кислота. Когда вода проходит через нижние слои – идут реакции их регенерации, т. е. образуются те же соли, но в присутствии сильных кислот диссоциация угольной кислоты подавлена, поэтому образовавшийся в верхних слоях CO_2 находится в растворенном виде и проходит через фильтр. Образование вторичной щелочности возможно только в самых нижних слоях, когда в фильтрате нет сильных кислот.

Другие схемы коррекции щелочности воды применяются, если невозможно H -катионирование, т. к. здесь:

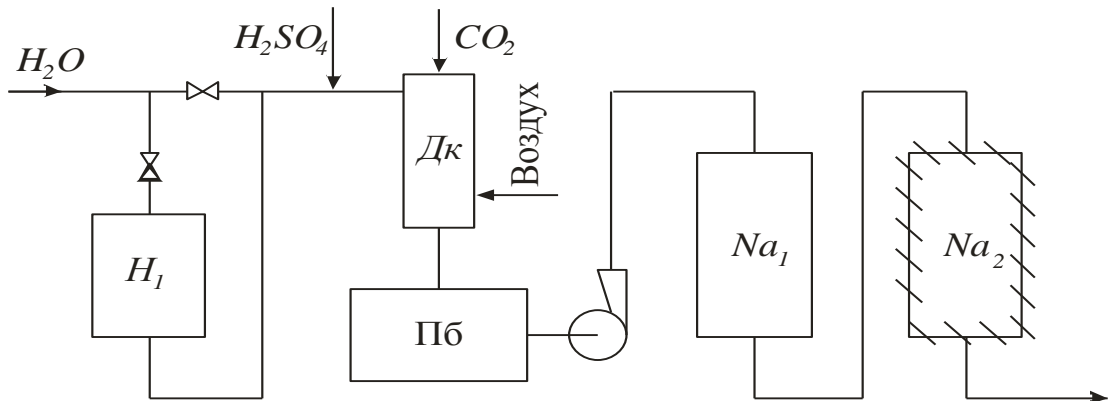
- снижается расход кислоты;
- ликвидируются кислые стоки при регенерации;
- снижается щелочность воды, но вода не кислая.

Недостатком этих схем умягчения воды является необходимость перераспределения потоков при работе, т. к. с целью экономии кислоты H -катионитный фильтр отключается на регенерацию только по проскоку ионов жесткости, и фильтрат имеет сначала кислую, а после проскоков ионов Na^+ – щелочную реакцию, потому что, как говорилось выше, H -катионитный фильтр работает в режиме Na -катионитных фильтров.

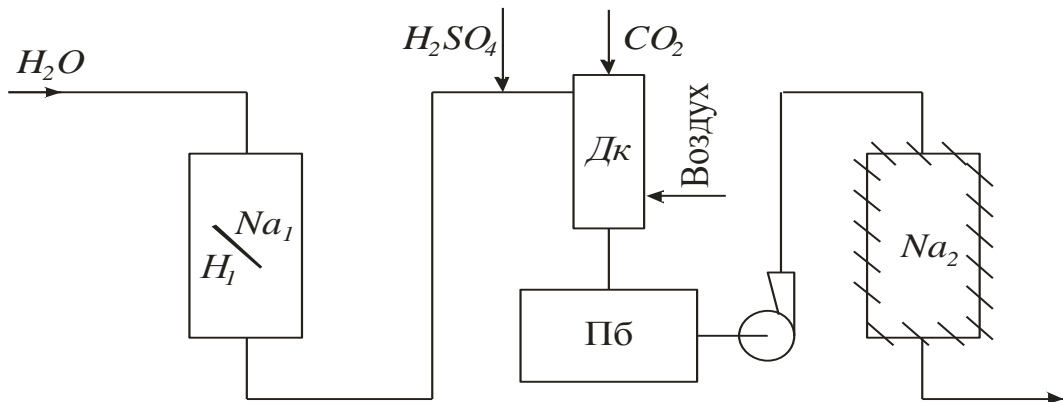
Смешанное H - Na -катионирование отличается от предыдущих схем тем, что поток воды не разделяется, а пропускается весь через фильтр, который заполнен катионитом в формах H^+ и Na^+ . Для этого регенерация проводится в два этапа: сначала серной кислотой, в количестве, необходимом для вытеснения ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} , а затем поваренной солью. При этом в верхних слоях катионит находится в основном в H -форме, а в нижних – в Na -форме. Величина щелочности во время фильтроцикла сначала понижается, а к концу повышается.



Параллельное H - Na -катионирование.



Последовательное H - Na -катионирование.



Совместное H - Na -катионирование.

Рисунок 3.10 – Схемы совместного H - Na -катионирования

H_1 – H -катионитовый фильтр первой ступени; Na_1 – Na -катионитовый фильтр первой ступени; Na_2 – Na -катионитовый фильтр второй ступени; $Дк$ – декарбонизатор; $Пб$ – промежуточный бак

Значительно меньшее изменение щелочности происходит при катионировании с «голодной» регенерацией *H*-катионитных фильтров.

В настоящее время получила распространение схема *Na-Cl*-ониорования. Преимущество этой схемы в том, что для регенерации используется один вид реагента, что дает существенную экономию его, и нет необходимости в установке декарбонизатора, т. к. анионы сильных кислот (кроме Cl^-) и анион HCO_3^- сорбируются в анионитном фильтре, содержащем высокоосновной анионит в *Cl*-форме.

3.2.4 Обессоливание воды

Для получения обессоленной воды применяют совместное катионирование и анионирование воды. В зависимости от степени удаления ионов различают частичное, глубокое и полное химическое обессоливание. Регенеранты *Na OH* для I и II ступеней. Для I ступени может применяться $Na_2 CO_3$.

При частичном обессоливании удаляются все катионы и частично анионы HCO_3^- и Cl^- . *H*-катионитные фильтры отключаются по проскоку жесткости. Ионы HCO_3^- появляются в обессоленной воде вследствие неполной декарбонизации CO_2 в карбонизаторе и переходе его обратно в форму HCO_3^- при повышении *pH* воды при анионировании, а в *OH*-анионитном фильтре они не задерживаются, т. к. в нем применяется низкоосновной анионит.

При глубоком обессоливании применяют по 2 ступени *H*-катионитных и *OH*-анионитных фильтров, причем в первой ступени – низкоосновной анионит, а во второй – высокоосновной.

Полное химическое обессоливание осуществляется с применением в качестве последней ступени фильтров смешанного действия (ФСД) – рисунок 3.11.

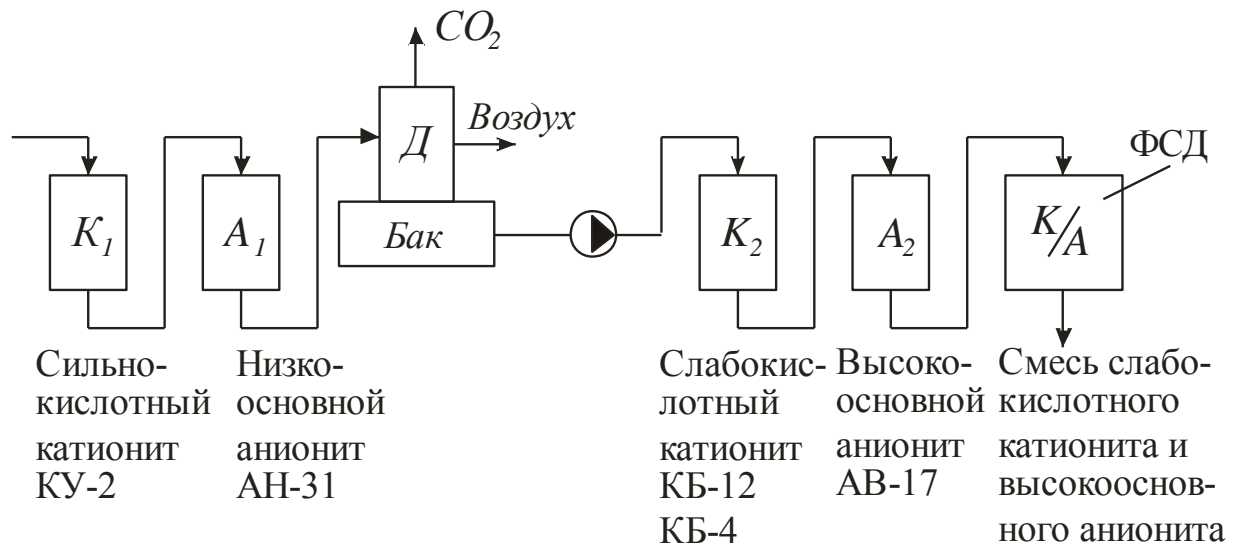


Рисунок 3.11 – Схема полного химического обессоливания

K_1 – катионитный фильтр 1-й ступени; A_1 – анионитный фильтр 1-й ступени; K_2 – катионитный фильтр 2-й ступени; A_2 – анионитный фильтр 2-й ступени; ФСД – фильтр смешанного действия; Д – деаэратор

Декарбонизатор может устанавливаться и после фильтра второй ступени K_2 .

Фильтры смешанного действия могут быть двух типов: с «внутренней» и «внешней» регенерацией (рисунок 3.12).

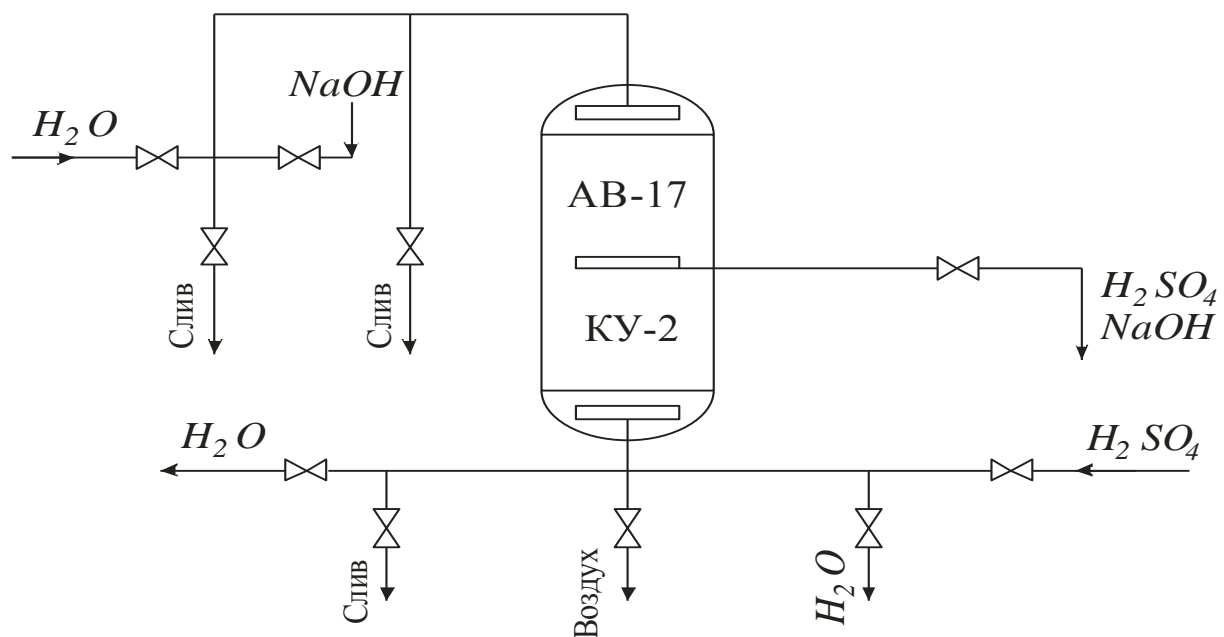


Рисунок 3.12.1 – Схема напорного фильтра смешанного действия с «внутренней» регенерацией

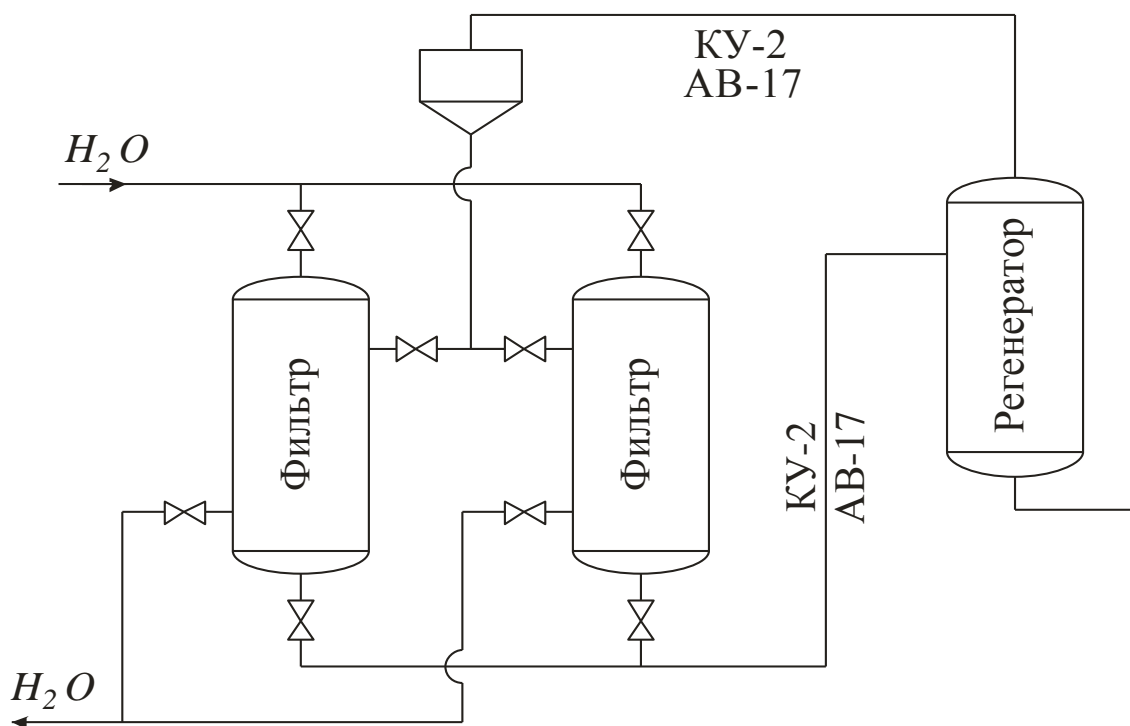


Рисунок 3.12.2 – Схема установки смешанного действия с «внешней» регенерацией

4. МЕТОДЫ СТАБИЛИЗАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ВОДЫ

Лекция 5

4.1 Показатели стабильности воды

Вода, находящаяся в стабильном состоянии, сохраняет неизменным соотношение концентраций всех растворенных в ней примесей (кроме газообразных); неспособна к выделению нерастворимых отложений карбоната кальция и не является агрессивной; не вызывает образования в системах охлаждения отложений минерального и биологического характера.

4.2 Методы стабилизации воды

Почти все известные методы стабилизационной обработки воды основаны на трех принципах:

1. *Изменение концентрации* тех или иных растворенных в воде примесей, участвующих в процессах образования отложений или коррозии металлов;
2. *Добавление к воде специальных реагентов – ингибиторов*, тормозящих процессы кристаллизации (образования отложений) или коррозии металлов;
3. *Замедление указанных процессов накипеобразования и коррозии путем физической или физико-химической обработки, не изменяющей состава примесей воды.*

Первый принцип стабилизационной обработки воды может осуществляться путем уменьшения или увеличения концентрации примесей, содержащихся в исходной воде, в зависимости от начального состояния этой системы. На этом принципе основано применение: осветления (удаление взвеси); продувки систем охлаждения (снижение концентрации всех веществ, растворенных в воде); обработка воды известью (снижение содержания кальция, свободной и связанной углекислоты); обработка воды дымовыми газами – рекарбонизация воды (повышение содержания свободной углекислоты);

частичного водород-катионирования (снижение концентрации ионов Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} и HCO_3^- , увеличение количества свободной CO_2); подкисления (снижение концентрации связанной и увеличение концентрации свободной углекислоты). К этой же группе относят: термическую деаэрацию и химическое обескислороживание воды (удаление или связывание агрессивных газов); обработку охлаждающей воды окислителями (хлор, гипохлорит и др.) для снижения содержания в воде живых организмов.

На втором принципе основана обработка воды фосфатами, хроматами и другими замедлителями накипеобразования и коррозии металла.

Третья группа методов обработки воды: обработка воды магнитным полем ультрафиолетовыми лучами, слабым электрическим током; стерилизация воды путем ее термической обработки.

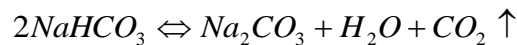
Указанные методы в той или иной степени рассматривались ранее или будут рассмотрены ниже.

5. УДАЛЕНИЕ ИЗ ВОДЫ РАСТВОРЕННЫХ ГАЗОВ

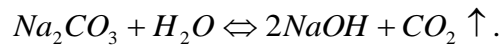
5.1 Теоретические основы деаэрации воды

5.1.1 Термическая деаэрация

Растворённые в воде газы (O_2 и CO_2) при высоких температурах обладают высокой коррозионной активностью. Различают следующие методы удаления растворенных газов из воды: термический и химический. Из всех способов дегазации воды наиболее распространён термический (деаэрация). Этот способ основан на свойстве газов снижать растворимость при повышении температуры воды, когда парциальное давление O_2 и CO_2 снижается до нуля (Закон Генри). Увеличивая парциальное давление водяных паров над жидкостью, снижается парциальное давление O_2 и CO_2 и снижается их растворимость. Одновременно будет происходить распад бикарбонатов



и гидролиз образующихся карбонатов



5.1.2 Химическое связывание растворенных газов

Химическое связывание свободной углекислоты

Ранее для связывания углекислоты применялось подщелачивание едким натром питательной воды. Однако это приводит к увеличению размера продувки.

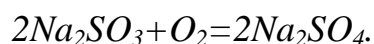
Замена едкого натра тринатрийфосфатом выгодна тем, что устраняет надобность в дополнительном реагенте, т. к. им производится коррекционная обработка котловой воды.

Для связывания свободной углекислоты питательную воду обрабатывают аммиаком, при этом аммиак конденсируется вместе с паром и присутствует в конденсате. Углекислота связывается в бикарбонат аммония



Химическое связывание кислорода

Используется как дополнительное к термической деаэрации в закрытых системах теплоснабжения. Применяется дозирование сульфита натрия:



Сульфит натрия вводится в питательную воду в виде 2 – 10 % раствора с расходом

$$G = (8C_k + K) / \varepsilon, \quad (5.1)$$

где ε – содержание активного вещества в техническом реагенте;

C_k – содержание кислорода в обрабатываемой воде;

K – избыток реагента (2 – 3 мг/л).

5.2 Деаэраторы и декарбонизаторы

5.2.1 Деаэраторы

Деаэраторы разделяют на три группы:

- атмосферные (ДСА) – 0,112 – 0,12 МПа (104 °С) – рисунок 5.1, 5.2;
- вакуумные (ДВ) – 7,5 – 50 кПа (40-80 °С) – рисунок 5.3;
- повышенного давления (ДП) – 0,6 – 0,8 МПа (158 – 164 °С).

Деаэраторы устанавливаются как в помещениях, так и на площадках (при этом обеспечивается защита от атмосферных осадков). Деаэраторы устанавливают на высоте 5 – 10 м с тем, чтобы обеспечить гарантированный подпор на всасывании питательного насоса (чтобы вода не вскипала в камере насоса).

Деаэраторы вакуумного типа устанавливают в водогрейных котельных с низкими параметрами горячей воды.

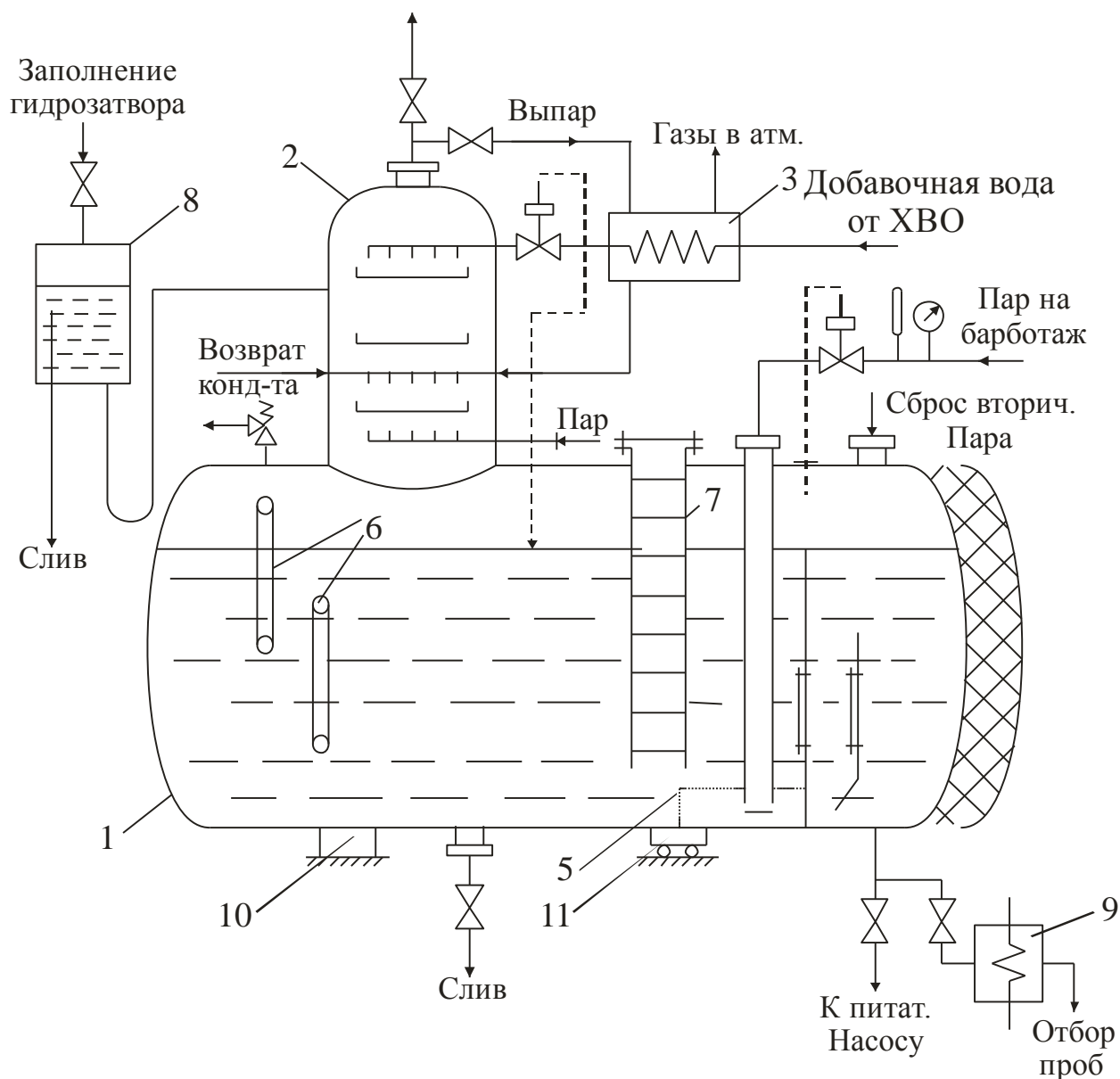


Рисунок 5.1 – Схема деаэратора струйного атмосферного (ДСА) барботажного с деаэрационной колонкой

1 – бак аккумулятор (с теплоизоляцией); 2 – деаэрационная колонка; 3 – охладитель выпара; 4 – перегородки (с люками для ремонта); 5 – барботажная камера; 6 – водомерные стёкла; 7 – лестница; 8 – гидрозатвор; 9 – охладитель проб; 10, 11 – неподвижная и подвижная опоры.

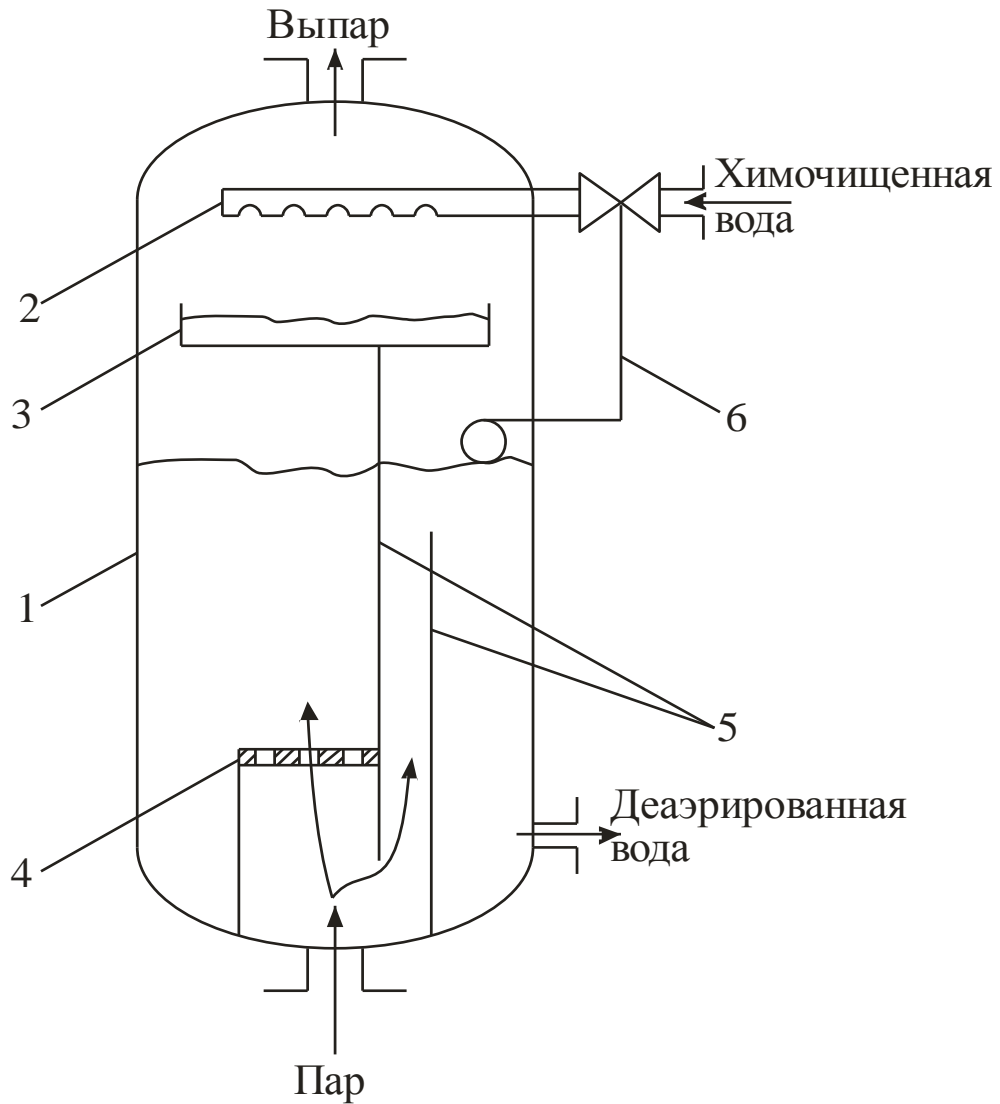


Рисунок 5.2 – Схема ДСА вертикального типа

1 – корпус; 2 – распределительный коллектор; 3 – тарелка; 4 – барботажный лист;
5 – перегородки; 6 – регулятор уровня

Для сокращения потерь тепла и конденсата на деаэраторы устанавливаются охладители выпара (рисунок 5.4), в которых водяной пар отделяется от неконденсирующихся газов.

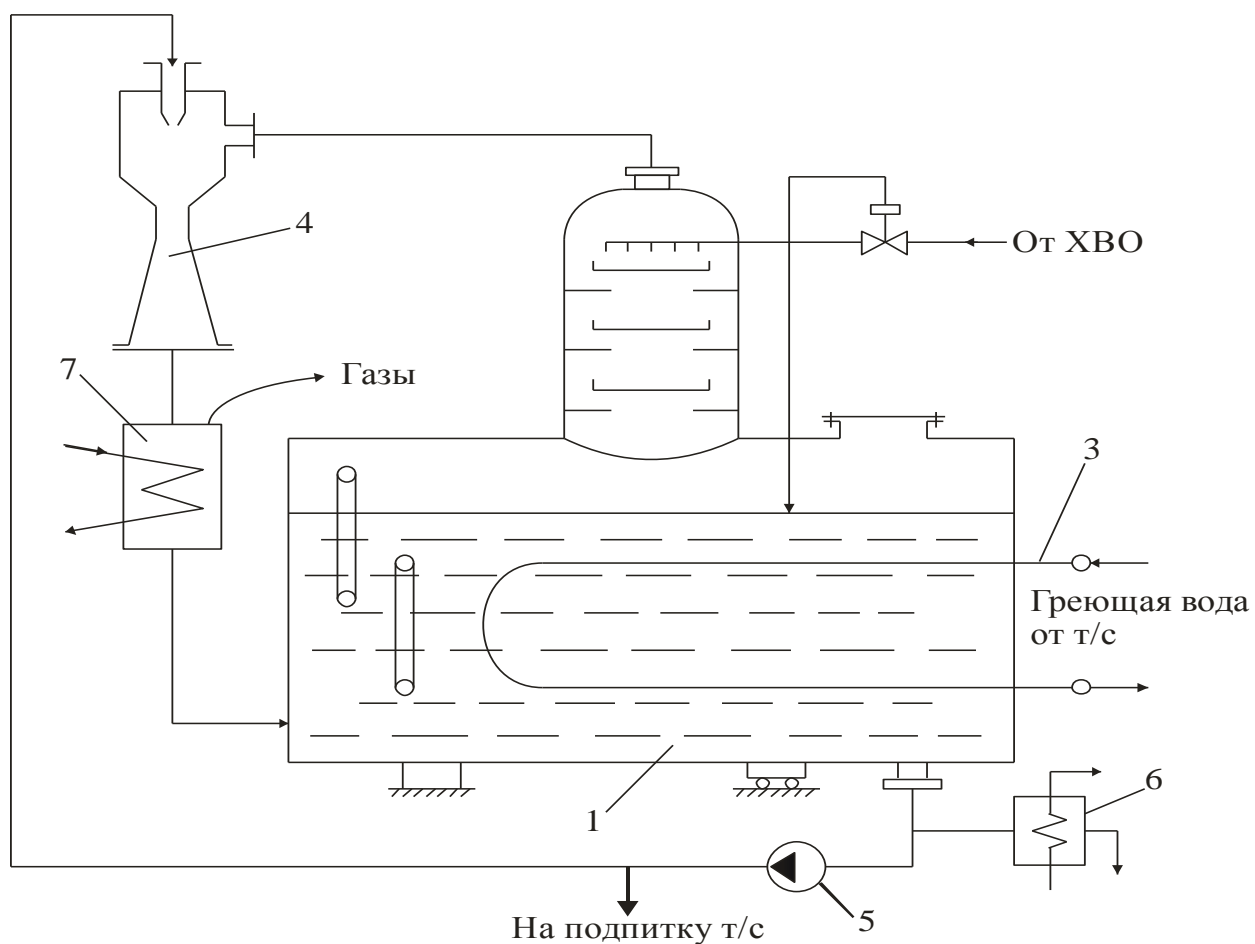


Рисунок 5.3 – Схема деаэратора вакуумного типа

1 – бак аккумулятор; 2 – деаэрационная колонка; 3 – змеевик; 4 – эжектор; 5 – питательный насос; 6 – охладитель проб; 7 – охладитель выпара

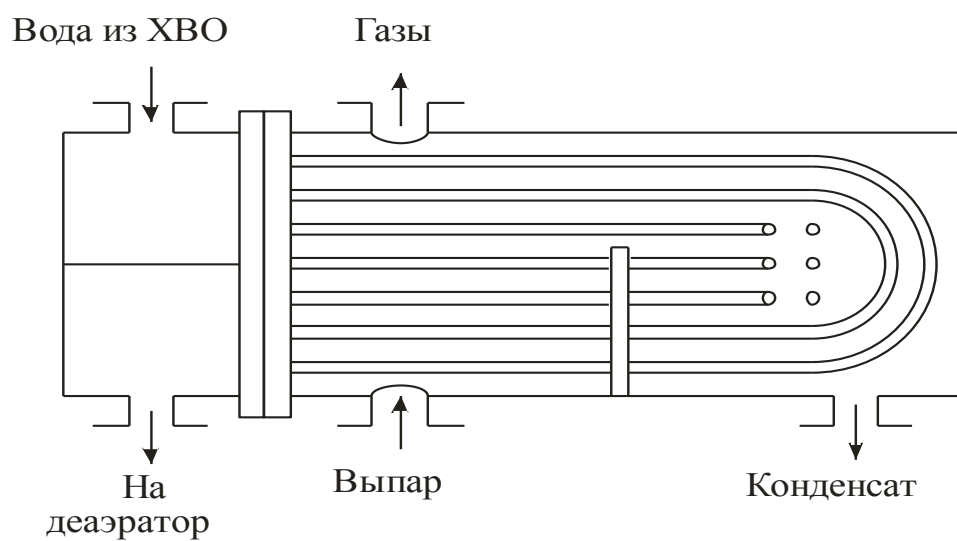


Рисунок 5.4 – Охладитель выпара

5.2.2 Декарбонизаторы

Декарбонизаторы (рисунок 5.5) служат для удаления CO_2 из воды после H -катионирования при продувании воздухом. Создаются условия, снижающие парциальное давление CO_2 над слоем воды.

Десорбция CO_2 из воды усиливается путём разделения воды на ряд тонких струй, для чего применяются насадки (кольца Рашига). Обработываемая вода подаётся сверху, воздух – снизу при помощи вентилятора. Для загрузки и выгрузки колец существуют два люка. Внутренние поверхности покрыты защитным покрытием.

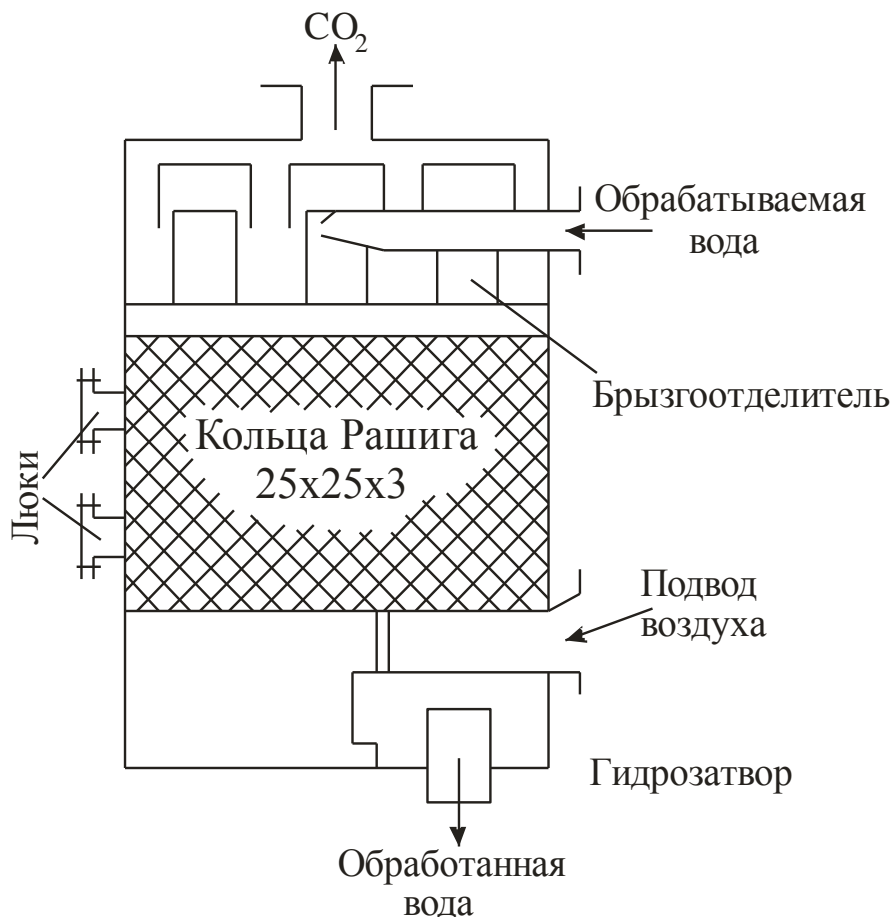


Рисунок 5.5 – Схема декарбонизатора

6. ФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ ВОДЫ

Лекция 6

6.1 Магнитная обработка воды

При магнитной обработке воды содержание солей не изменяется, а изменяется их физическое состояние (форма и величина кристаллов), благодаря чему растворённые в воде накипеобразующие соли теряют способность отлагаться в виде накипи на внутренней поверхности теплоаппаратов, выделяются в толще воды как шлам, постепенно оседающий на дно теплообменника и легко удаляемый с продувкой. Накипь не образуется при температуре выше 100°C при исходной воде с карбонатной жесткостью до $10 \text{ мг} - \text{экв/л}$.

В основном этот метод используется для чугунных секционных котлов.

Процесс магнитной обработки воды происходит в аппаратах с мощными электромагнитами или постоянными магнитами (рисунок 6.1).

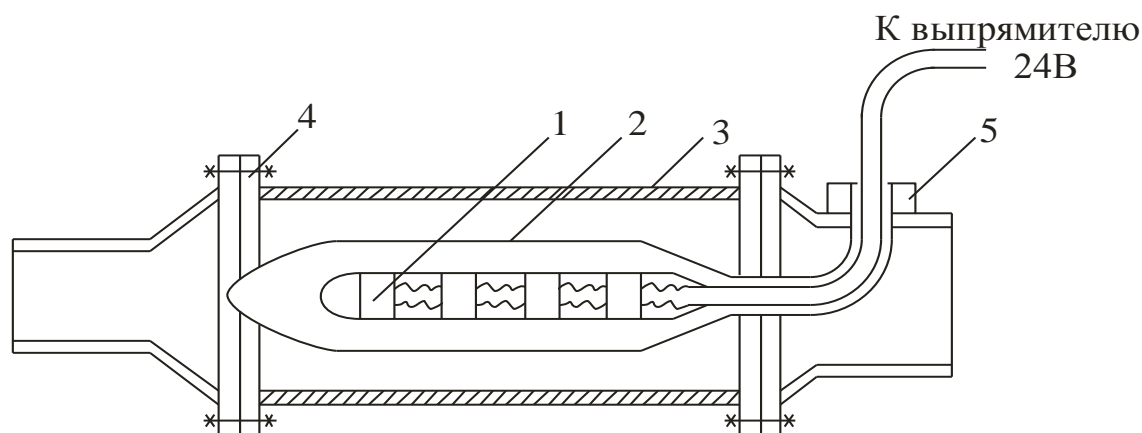


Рисунок 6.1 – Схема магнитного аппарата ВТИ
(устанавливается вертикально)

1 – электромагнит; 2 – латунная гильза; 3 – стальной корпус; 4 – фланцы с патрубками; 5 – уплотнительный штуцер.

6.2 Электролиз

Электролиз – это процесс опреснения воды под действием постоянного электрического поля при помощи ионселективных мембран (рисунок 6.2).

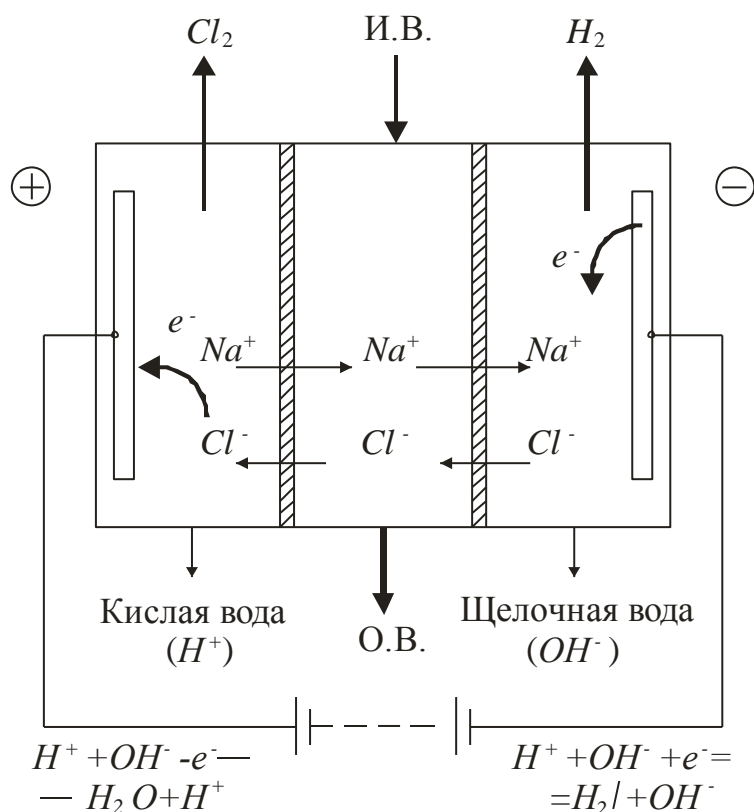


Рисунок 6.2 – Схема трёхкамерной электродиализной ванны

В щелочной камере образуется осадок в виде $Mg(OH)_2$.

Электродиализ представляет собой комбинированный метод, в котором сочетаются электролиз и диализ. Впервые электролиз был применен в 1890 году для очистки сахарных растворов от минеральных солей. Развитие технологии шло вместе с разработкой новых ионообменных мембран, применяющихся в качестве основных составляющих данного метода умягчения минерализованных вод. Своего первого крупного успеха электродиализ с ионообменными мембранами добился при решении проблемы опреснения шахтных вод в Южно-Африканской республике. В 1959 году была введена в эксплуатацию опреснительная установка производительностью 11000 м³/сутки.

Электродиализная установка обычно представляет собой параллелепипед, изготовленный из электроизоляционного полимерного материала и

разделенный на секции чередующимися анионообменными и катионообменными мембранами. Электродиализный метод опреснения воды заключается в разделении солей, содержащихся в минерализованной воде на катионы и анионы за счет создаваемого электрического поля. Погруженные в воду катод и анод отделяются от основного потока анионообменными и катионообменными мембранами, которые соответственно пропускают только ионы соответствующего заряда. Катионообменная мембрана располагается со стороны катода и пропускает только катионы, движущиеся к катоду, а анионообменная мембрана пропускает только анионы, движущиеся к аноду. В результате комбинация анионообменных и катионообменных мембран, соединенных в камеры, позволила создать многокамерные электродиализные установки с высокой единичной производительностью.

Электродиализные опреснители по степени использования стоят на втором месте после термоопреснительных установок. Общая производительность электродиализных установок в Европе превышает производительность любого другого метода деминерализации, а в США электродиализ несколько уступает только другому методу – обратному осмосу.

6.3 Обратный осмос

Процесс обратного осмоса как способ деминерализации воды начал активно использоваться с конца 60-х годов прошлого столетия.

Явление осмоса предполагает фильтрацию минерализованной воды через полупроницаемые мембраны, поры которых пропускают молекулы и гидратированные ионы солей. Вследствие разности уровня концентраций солей в умягченной воде и минерализованной воде, по обе стороны полупроницаемой мембраны возникает разность осмотических давлений, препятствующая переходу молекул воды через полупроницаемую мембрану в пресную воду. Создав дополнительное давление со стороны минерализованной воды, достаточное для преодоления осмотических сил, можно осуществлять

принудительный переход молекул воды в опресненную воду, вследствие чего данный процесс и был назван «обратный осмос».

В зависимости от уровня концентрации и термодинамических свойств солей изменяется и величина обратноосмотического давления. Осмотическое давление океанской воды находится в пределах 2,45 МПа, тогда как необходимое давление для опреснения такой воды с помощью обратного осмоса составляет 6,8 МПа.

Так как энергия при обратноосмотическом опреснении расходуется только на создание давления опресняемой воды, то с термодинамической точки зрения она приближается к величине минимальной термодинамической работы разделения водного раствора солей. Так, например, если теоретическая минимальная термодинамическая работа разделения для океанской воды (35 г/л) равна 2,67 МДж/м³, то в обратноосмотических установках большой производительности расход энергии на опреснение этой же воды составляет 7,2 – 9,0 МДж/м³, что, однако, в 10 – 15 раз меньше чем при термическом опреснении.

Метод обратноосмотического опреснения занимает третью позицию по степени применения после электродиализного способа.

Метод обратноосмотического опреснения требует предварительной обработки воды (предочистки), т. к. мембраны чувствительны к механическому и биологическому загрязнению.

7. ВОДОПОДГОТОВИТЕЛЬНЫЕ УСТАНОВКИ

Лекция 7

7.1 Питательные устройства

1. Для питания водой котла допускается применение следующих питательных устройств:

- а) центробежных и поршневых насосов с электроприводом;
- б) поршневых и центробежных насосов с паровым приводом;
- в) паровых инжекторов (рисунок 7.1);
- г) насосов с ручным приводом.

Насосы характеризуются производительностью (подача) и напором (развиваемым на выходе давлением).

Поршневые насосы могут развивать напор независимо от сопротивления (до останова двигателя или колонки), поэтому поршневые насосы должны иметь предохранительный клапан (или устанавливается предохранительный клапан после насоса до запорной арматуры). Подача насоса пульсирующая (зависит от числа плунжеров). При необходимости сглаживания пульсаций устанавливается ресивер.

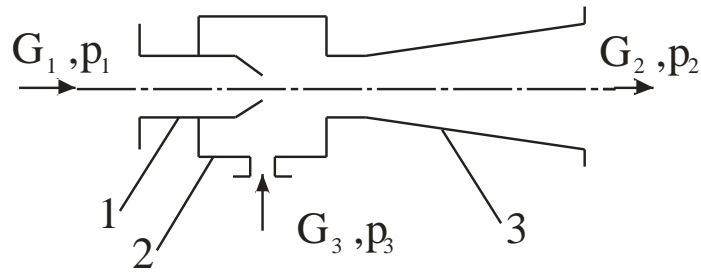
Центробежные насосы подачу имеют равномерную, однако напор насоса зависит от подачи.

Регулирование производительности:

центробежные – подпором (закрытием, открытием задвижки); рециркуляцией;

поршневые – длиной хода поршня; рециркуляцией.

Неполадки – неисправности привода; износ муфты; выработка подшипников; протечки сальника (выработка набивки; выработка шейки вала); повреждение рабочего колеса; износ ремня.



$$G_2 = G_1 + G_3$$

Рисунок 7.1 – Схема инжектора
(эжектора, элеватора, струйного насоса)

1 – сопло; 2 – камера смешения; 3 – диффузор

Для сопла, в связи с неразрывностью струи $G = const = wF$, скорость струи при проходе через сопло возрастает. Согласно закону Бернулли ($z = \frac{p}{\rho} + \frac{w^2}{2g} = const$), гидродинамическое давление возрастает, а статическое снижается. В камере смешивания создаётся разрежение.

2. На корпусе каждого питательного насоса и инжектора должна быть прикреплена табличка с данными:

- а) наименование завода изготовителя;
- б) год изготовления и заводской номер;
- в) номинальная подача при номинальной температуре воды, м³/ч (л/мин);
- г) число оборотов в минуту для центробежных насосов или число ходов в минуту у поршневых насосов;
- д) максимальный напор при номинальной подаче, м вод. ст. (кгс/см²); (1 кгс/см² ≈ 10 м вод. ст.);
- е) номинальная температура воды перед насосом, °С.

При отсутствии заводского паспорта должно быть проведено испытание насоса для определения его подачи и напора. Такое испытание должно производиться после каждого капитального ремонта.

3. Напор насоса должен обеспечивать питание котла водой при давлении, соответствующем полному открытию рабочих предохранительных клапанов, установленных на котле (т. е. для котлов с $P_{раб}$ до $13 \text{ кгс/см}^2 - P_{раб} + 0,3 \text{ кгс/см}^2$; от 13 до $60 \text{ кгс/см}^2 - 1,05P_{раб}$), а также с учетом потери напора в нагнетательной линии.

4. Для питания котлов с $P_{раб} \leq 4 \text{ кгс/см}^2$ и паропроизводительностью не более 1 т/ч разрешается использование *водопровода* в качестве резервного источника питания, если давление воды в последнем, непосредственно у котла, превышает разрешенное давление в котле не менее чем на $1,5 \text{ кг/см}^2$.

5. Для котлов с $P_{раб} \leq 4 \text{ кгс/см}^2$ и паропроизводительностью не более 150 кг/ч с периодическим питанием допускается применение *ручных питательных насосов*.

6. Питание паровых котлов с различными рабочими давлениями должно осуществляться от самостоятельных питательных устройств. (Допускается питание от одного устройства, если разница рабочих давлений котлов не превышает 15 %).

Питательные насосы, присоединяемые к общей магистрали, должны иметь характеристики, допускающие параллельную работу насосов.

7. В качестве питательных приборов вместо насосов с паровым приводом допускается применение инжекторов в том же количестве и той же производительности.

8. При применении насосов только с электроприводом должно быть устройство автоматического переключения с одного независимого источника питания на другой.

7.1.1 Количество и подача питательных устройств

1. Для питания паровых котлов должно быть установлено не менее двух приводимых в действие независимо друг от друга питательных насосов,

из которых один или более должны быть с паровым приводом. Суммарная подача насосов с электроприводом должна быть не менее 110 %, а с паровым приводом – не менее 50 % номинальной паропроизводительности всех работающих котлов.

Допускается установка всех питательных насосов только с паровым приводом, а при наличии двух или более независимых источников питания электроэнергией – только с электроприводом. Насосы для паровых котлов давлением не более 4 кгс/см² могут быть только с электроприводом при одном источнике питания электроэнергией. В этих случаях количество и подача питательных насосов выбирается с расчетом, что при остановке самого мощного насоса суммарная подача оставшихся насосов была не менее 110 % номинальной паропроизводительности всех рабочих котлов.

Допускается работа котлов паропроизводительностью не более 1 т/ч с одним питательным насосом с электроприводом, если котлы снабжены автоматикой безопасности, исключающей возможность понижения уровня воды и повышения давления выше допустимого.

2. Для питания котлов-бойлеров при отсутствии отбора пара, помимо бойлера, должно быть установлено не менее двух насосов суммарной подачей не менее 50 % паропроизводительности самого мощного котла. При наличии отбора пара, помимо бойлера, суммарная подача насосов увеличивается с учетом фактического отбора пара.

3. Для подпитки водогрейных котлов с естественной циркуляцией должно быть установлено не менее двух насосов, а для водогрейных котлов с принудительной циркуляцией должно быть установлено не менее двух насосов для подпитки и не менее двух циркуляционных насосов, причем напор и подача насосов должны быть выбраны с расчетом, что при выходе из строя самого мощного насоса, оставшиеся могли обеспечить нормальную работу котлов.

Насосы для водогрейного котла теплопроизводительностью 4 Гкал/ч и более должны иметь два независимых источника питания электропривода.

Для подпитки водогрейных котлов вместо одного из общего количества насосов допускается применять водопровод, если давление в нём непосредственно у места присоединения к котлу превышает сумму статического и динамического напоров не менее чем на $1,5 \text{ кгс/см}^2$.

Напор, создаваемый циркуляционными и подпиточными насосами, должен исключать возможность вскипания воды в котле и системе.

4. Питательный трубопровод должен быть рассчитан на максимальное давление, создаваемое подпиточными насосами.

Питание котлов паропроизводительностью 4 т/ч и более со слоевым способом сжигания топлива, а при любом другом способе сжигания топлива, только при наличии барабанов, обогреваемых горячими газами, должно осуществляться по двум независимым друг от друга независимым питательным трубопроводам. Допускается одна питательная линия между регулятором питания и котлом.

7.1.2 Проверка питательных насосов

Исправность всех питательных насосов или инжекторов должна проверяться путём кратковременного пуска каждого из них в работу:

- у котлов с $P_{\text{раб}} < 24 \text{ кгс/см}^2$ не реже одного раза в смену;
- у котлов с $P_{\text{раб}} > 24 \text{ кгс/см}^2$ в сроки, установленные производственной инструкцией.

При прекращении действия всех питательных приводов производится аварийная остановка котла.

7.1.3 Трубопроводы, арматура и приборы безопасности

1. Трубопроводы

В зависимости от транспортируемой среды и её параметров трубопроводы делятся на четыре категории (таблица 7.1).

Таблица 7.1 – Категории трубопроводов

Категория трубопровода	Среда	Рабочие параметры среды	
		Температура, °С	Давление, МПа
1	а – перегретый пар б – перегретый пар в – перегретый пар г – перегретый пар д – горячая вода, насыщенный пар	Выше 580 Выше 540 до 580 (вкл) Выше 450 до 540 (вкл) До 450 (вкл) Выше 115	Не ограничено Тоже Тоже Более 4,0 Более 8,1
2	а – перегретый пар б – перегретый пар в – горячая вода, насыщенный пар	Выше 350 до 450 (вкл) До 350 (вкл) Выше 115	До 4,0 (вкл) Более 2,3 до 4,0 (вкл) Более 4,0 до 8,1 (вкл)
3	а – перегретый пар б – перегретый пар в – горячая вода, насыщенный пар	Выше 250 до 350 (вкл) До 250 (вкл) Выше 115	До 2,3 (вкл) Более 1,7 до 2,3 (вкл) Более 1,7 до 4,0 (вкл)
4	а – перегретый и насыщенный пар в – горячая вода	Выше 115 до 250 (вкл) Выше 115	Более 0,08 до 1,7 (вкл) До 1,7 (вкл)

Категория трубопровода, определённая по рабочим параметрам среды (при отсутствии на нём устройств, изменяющих эти параметры), относится ко всему трубопроводу, независимо от его протяженности.

В зависимости от категории устанавливаются нормы прокладки изготовления, монтажа, эксплуатации и т. п.

Окраска и надписи на трубопроводах

Трубопроводы пара и горячей воды должны окрашиваться по всей длине и иметь цветные кольца (таблица 7.2). Расстояние между кольцами от 1 до 5 м в зависимости от местных условий.

Таблица 7.2 – Окраска трубопроводов

Теплоноситель	Цвет окраски	
	Основной	Кольца
Перегретый пар от 4,0 до 14,1 МПа	Красный	Черный
Перегретый пар до 4,0 МПа	Красный	б/к
Пар промперегрева	Красный	Голубой
Насыщенный пар	Красный	Желтый
Отборный пар	Красный	Зелёный
Конденсат	Зелёный	Синий
Химочищенная вода	Зелёный	б/к
Дренаж и продувка	Зелёный	Белый
Техническая вода	Черный	б/к
Пожарный водопровод	Оранжевый	б/к
Теплосеть водяная:		
прямая	Зелёный	Желтый
обратная	Зелёный	Коричневый

2. Арматура

Арматура характеризуется по назначению:

- запорная (вентили, задвижки, краны);
- предохранительная (обратные клапаны, предохранительные клапаны);
- регулирующая (регуляторы давления, температуры, расхода и т. п.).

В зависимости от параметров транспортируемой среды арматура подразделяется по условному давлению¹ (P_y).

В зависимости от присоединительного размера существуют стандартные ряды, характеризующиеся условным проходом² (D_y).

¹ Условное давление соответствует допускаемому рабочему давлению (избыточному) при нормальной температуре. (С увеличением температуры рабочее давление снижается).

² Условным проходом арматуры называется номинальный внутренний диаметр трубопровода, на котором установлена арматура. (Проходное сечение арматуры может отличаться от D_y).

В зависимости от допустимых протечек арматуру разделяют по герметичности на три класса.

В зависимости от вида материала корпуса, уплотнительных поверхностей, типа арматуры и вида привода введена система обозначений: первые две цифры – тип арматуры; буквы после цифр – материал корпуса; цифры после букв – вид привода; буквы после цифр – материал уплотнительных поверхностей или покрытие (таблица 7.3).

Таблица 7.3 – Обозначение арматуры

Тип арматуры	Условное обозначение
Кран пробно-спускной.	10
Запорное устройство указателя уровня.	12
Вентиль (клапан)	13,14,15
Клапан предохранительный	17
Клапан обратный подъёмный	16
Клапан обратный поворотный	19
Регулятор давления	21
Клапан регулирующий	25
Задвижка	30 и 31
Затвор	32
Материал корпуса	Условное обозначение
Углеродистая сталь	с
Легированная сталь	лс
Коррозионно-стойкая (нерж.)сталь	нж
Серый чугун	ч
Ковкий чугун	кч
Высокопрочный чугун	вч
Латунь, бронза	б
Алюминий	а
Пластмассы (кроме винипласта)	п
Винипласт	вп
Привод	Условное обозначение
Механический с червячной передачей	3
Механический с цилиндрической	4
Механический с конической	5
Пневматический	6
Гидравлический	7
Электромагнитный	8
Электрический	9

Материал уплотнительных поверхностей	Условное обозначение
Латунь, бронза Нержавеющая сталь Стеллит Сормайт Кожа Резина Пластмассы (кроме винипласта)	бр нж ст ср к р п
Внутреннее покрытие	Условное обозначение
Гуммирование Эмалирование Футерование пластмассой	ГМ ЭМ П

3. Требования котлонадзора к арматуре

Арматура, установленная на котле или трубопроводах, должна иметь маркировку:

- а) наименование или товарный знак завода изготовителя;
- б) условный проход;
- в) условное давление или рабочее давление и температура среды;
- г) направление потока среды.

Арматура с $D_y > 20$ мм, изготовленная из легированной стали, должна иметь паспорт, в котором указывается марки материалов, условный проход и условное давление.

На маховиках должны быть знаки, указывающие направления вращения при открытии и закрытии.

На всех трубопроводах котлов, пароперегревателей и экономайзеров присоединение арматуры должно выполняться на сварке или фланцах. В котлах паропроизводительностью не более 1 т/ч допускается присоединять арматуру на резьбе при $D_y < 25$ мм и $P_y < 8$ кгс/см² (для насыщенного пара).

У каждого котла паропроизводительностью 4 т/ч и более управление главным парозапорным органом должно осуществляться с места машиниста.

На питательном трубопроводе должны быть установлены запорный орган и обратный клапан. Запорный орган устанавливается между котлом и обратным клапаном.

При установке нескольких питательных насосов, имеющих общие всасывающие и нагнетательные трубопроводы, у каждого насоса на стороне всасывания и нагнетания должна быть регулирующая питательная арматура.

7.2 Оборудование ХВО

7.2.1 Ионитные фильтры

Фильтры разделяют на два класса:

- параллельноточные;
- противоточные.

По ступеням:

- первой ступени;
- второй ступени (фильтры второй ступени имеют меньшую высоту, т. к. требуемый объём их загрузки меньше, в связи с меньшей нагрузкой. Скорости фильтрования до 60 м/ч. Скорости фильтрования фильтров первой ступени 5 – 15 м/ч).

Выпускаются фильтры: $\varnothing 480$, $\varnothing 700$, $\varnothing 800$ мм;

для блочных ВПУ: $\varnothing 1000$, $\varnothing 1500$, $\varnothing 1400$, $\varnothing 2000$, $\varnothing 2600$, $\varnothing 3000$, $\varnothing 3400$ мм – I и II ступеней.

Схемы одноэтажных, напорных, горизонтального и вертикального, прямо-точных фильтров периодического действия (рабочее давление 6 кгс/см²) даны на рисунках 7.2 и 7.3. На рисунках указаны рабочие потоки, обвязка фильтра предусматривает: подвод исходной воды; регенерационного раствора; взрыхляющей воды; слива; отвод обработанной воды; отвод взрыхляю-

шей воды; воздушник; пробоотборник (на входе в фильтр и на выходе) с манометрами и с установленной запорной арматурой соответствующего диаметра.

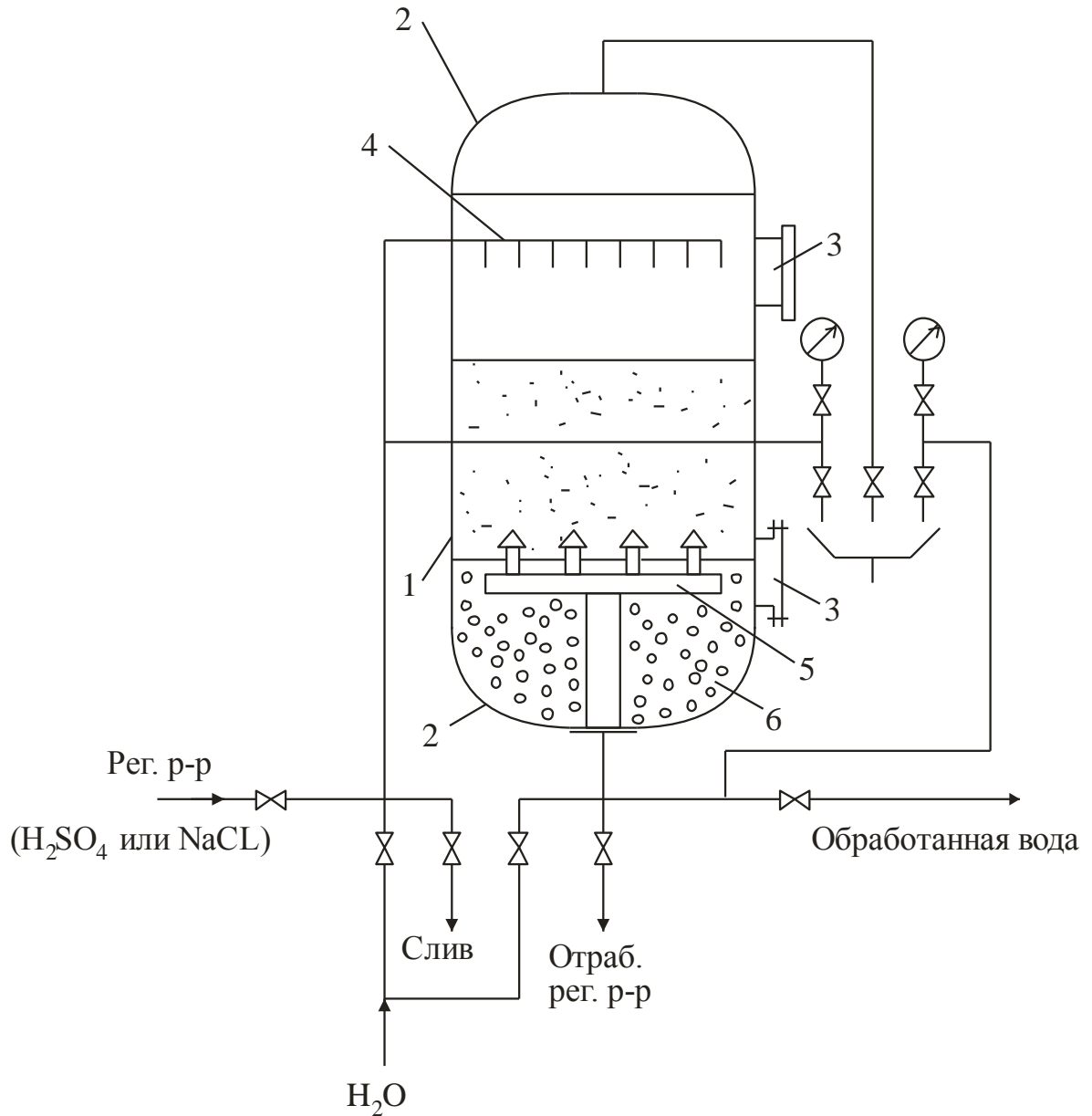


Рисунок 7.2 – Схема одноэтажного, напорного, вертикального, прямогоочного фильтра периодического действия

1 – корпус (с внутренним покрытием); 2 – эллиптические днища; 3 – люки для загрузки и выгрузки ионита; 4 – верхнее распределительное устройство; 5 – нижнее дренажное устройство; 6 – бетонная “подушка”. Высота загрузки 2/3 высоты фильтра.

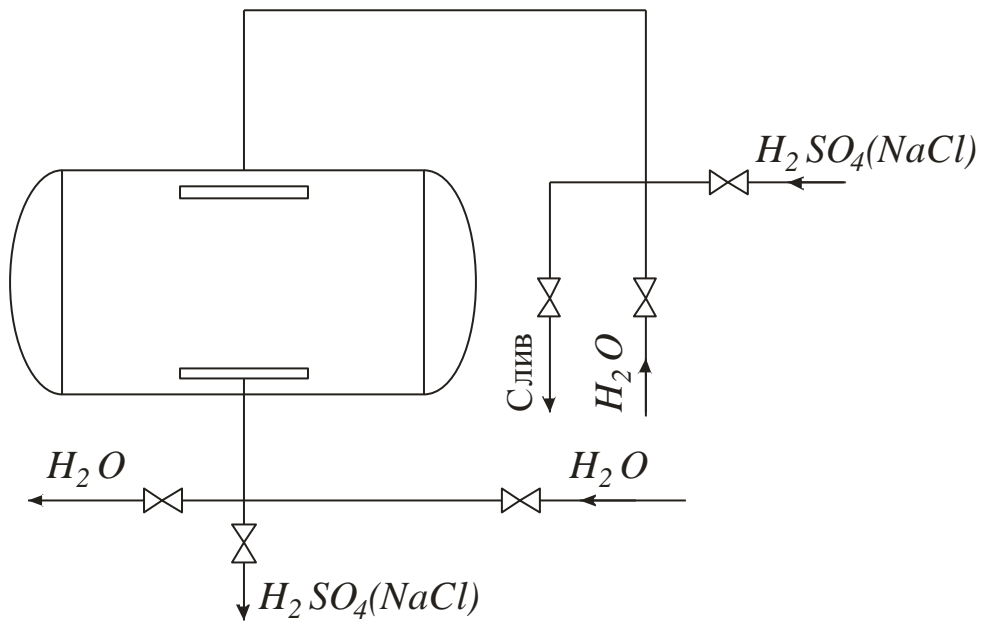


Рисунок 7.3 – Схема горизонтального, напорного фильтра периодического действия

Внутри фильтра установлено верхнее распределительное устройство (обычно лучевого типа). Верхнее распределительное устройство предназначено для подвода и равномерного распределения по сечению исходной воды, регенерационного раствора и отвода взрыхляющей воды.

Внизу фильтра устанавливается дренажное устройство, предназначенное для сбора и отвода обработанной воды.

Конструкции их различны:

- горизонтальные дренажные устройства (лучевого типа с щелевыми колпачками, с щелевыми трубами; типа «ложное днище»). Размеры щелей 0,3 – 0,5 мм;

- копирующие дренажные устройства (лучевого типа).

С целью предотвращения коррозии горизонтальные дренажи лучевого типа бетонируют до резьбы штуцеров. (Устанавливаются по уровню).

Корпус фильтра выполняется в виде цилиндрической обечайки с эллиптическими днищами. В корпусе имеются два люка для загрузки (выгрузки) ионита, осмотра и ремонта.

Внутри фильтров выполняется антикоррозийное покрытие. *Na*-катионитные покрывают изнутри перхлорвиниловым лаком (семь слоёв).

Устройство водород-катионитных и анионитных фильтров аналогично устройству натрий-катионитных фильтров. Выполняется обвязка из коррозионностойких материалов. Внутреннее покрытие: гуммирование, футеровка.

ФСД выполняются с внутренней регенерацией и с высокой регенерацией.

Заводы изготовители стандартного водоподготовительного оборудования:

1. Бийский котельный завод (БиКЗ).
2. Таганрогский котельный завод (ТКЗ).
3. Барнаульский котельный завод (БКЗ).
4. Саратовский завод тяжелого машиностроения (СЗТМ).
5. Монастырищенский машиностроительный завод (ММЗ).

Осветлительные фильтры:

вертикальные (двухкамерные и трёхкамерные);
горизонтальные.

БиКЗ – \varnothing , мм: 1000, 1400, 1500.

ТКЗ – \varnothing , мм: 1600, 2000, 2600, 3000, 3400.

Ионитные:

1. Паралельноточные (первой и второй ступени):

БиКЗ – \varnothing , мм: 1000, 1400, 1500.

ТКЗ – \varnothing , мм: 1600, 2000, 2600, 3000, 3400.

2. Противоточные с зажатым слоем:

ТКЗ – \varnothing мм: 1600, 2000, 2600, 3000, 3400.

3. Смешанного действия:

ТКЗ – ФСД с внутренней регенерацией \varnothing 2000 мм.

ФСД с выносной регенерацией – \varnothing , мм: 2000, 2600, 3400. (Регенератор – \varnothing , мм: 1600, 2000, 2600).

7.2.2 Реагентное хозяйство фильтров

Реагентное хозяйство предназначено для приемки и хранения реагентов (поваренной соли, серной кислоты, щелочи) и приготовления из них рабочих растворов для регенерации истощенных фильтров.

Поступающая соль может храниться как в сухом виде, так и в «мокром» – в виде концентрированного раствора в солевых ямах.

Солерастворители применяются для приготовления регенерационного раствора нужной концентрации и его механической очистки от взвешенных частиц.

7.3 Эксплуатация ВПУ: контрольно-измерительные приборы; средства автоматизации ВПУ

7.3.1 Система автоматического регулирования

Системой автоматического регулирования (САР) называют регулируемый объект вместе с автоматическим регулятором. САР представляет собой замкнутую систему. Процесс регулирования характеризуется передачей воздействий от одного звена к другому по замкнутому контуру.

Все физические величины, участвующие в процессе регулирования, взаимосвязаны и влияют друг на друга. Поэтому процесс регулирования есть не сумма процессов в отдельных звеньях системы, а единый круговой процесс. В процессе регулирования нельзя определить работу отдельного звена, не зная состояния в данный момент всех остальных звеньев.

САР можно считать состоящей из двух звеньев: объекта регулирования и автономного регулятора. В этом случае, разбирая процесс регулирования, нельзя оценивать отдельно работу регулятора без учета свойств и характери-

стик объектов регулирования. В конечном итоге напрашивается вывод о том, что не может быть плохого или хорошего регулятора вообще, если ничего не говорится об объекте регулирования. О качестве автоматического регулятора можно судить только тогда, когда исследована его работа совместно с регулируемым объектом.

Работа САР характеризуется качеством процесса регулирования. В свою очередь, качество процесса регулирования оценивается следующими показателями:

- максимальным отклонением регулируемого параметра от заданного значения при переходном процессе; это так называемая динамическая ошибка регулирования, и по ней судят о точности регулирования, т. е. о точности поддержания заданного параметра в объекте регулирования;
- величиной перерегулирования, т. е. отклонением регулируемого параметра, после того как в процессе регулирования параметр достигнет заданного значения и перейдет через него, изменяя знак ошибки;
- статической ошибкой, т. е. отклонением регулируемого параметра от заданной величины (при установившемся равновесии);
- временем переходного процесса или быстродействием, т. е. временем, затрачиваемым на возвращение регулируемого параметра в заданные пределы после начала возмущающего воздействия;
- числом колебаний регулируемого параметра во время переходного процесса около заданного значения;
- видом переходного процесса.

САР будет характеризоваться приемлемым качеством регулирования, если все вышеназванные показатели будут удовлетворять заранее заданным пределам. А так как качество САР устанавливается во время переходного процесса, немаловажно иметь в виду, что сам переходный процесс во многом определяется характером возмущающих воздействий. Отсюда следует два важных вывода.

Первый вывод о том, что обычно получаемые теоретически дифференциальные уравнения переходного процесса САР составлены из предположения скачкообразного характера возмущающих воздействий. А такой характер изменения нагрузок встречается на практике весьма редко.

Решение задачи теоретического определения формы переходного процесса в САР представляет определенные трудности главным образом потому, что дело касается нестандартных процессов, закономерности которых еще недостаточно выяснены для их математического описания. Применяемые методы упрощения в значительной мере снижают точность проделанных расчетов. В связи с этим экспериментальная проверка САР приобретает весьма существенное значение, особенно тогда, когда речь идет о системах водоподготовки. Эти системы характеризуются наличием большого количества типовых объектов регулирования: насосы, фильтры, солерастворитель, деаэратор и др.

Второй важный вывод заключается в том, что при искусственном создании возмущающих воздействий следует стремиться к более точному соблюдению их характера в контуре. Последнее не всегда удается достаточно надежно воспроизвести. В этом, пожалуй, и заключается один из основных недостатков экспериментальной проверки качества САР.

В заключении по этому вопросу следует сказать, что необходимо тщательно проанализировать длительный опыт ее работы с учетом одного из немаловажных факторов – надежности.

САР должна быть устойчивой. Это значит, что колебания регулируемого параметра, возникшие под влиянием изменения нагрузок, должны затухать.

В неустойчивой системе возмущающие воздействия вызывают нарастающие по амплитуде колебания регулируемого параметра. Такая САР не может эксплуатироваться.

САР считается практически устойчивой, если в переходном процессе в ней возникает незатухающий колебательный процесс с допустимой амплитудой отклонений регулируемого параметра. Это – промежуточное положение между сходящимися и расходящимися колебательными переходными процессами.

7.3.2 Методы и технические средства контроля качества воды и пара и измерения концентрации раствора

Для измерения концентрации диспергированного или растворённого вещества служит ряд единиц:

1) мг/л или мкг/л – для разбавленных растворов (плотность которых близка к плотности воды) (C_1);

2) г/кг, мг/кг – для концентрированных растворов (C_2);

3) % - показывают, какое весовое количество вещества содержится в 100 весовых частях раствора (P);

4) при химических анализах:

- в молях (M_1), показывающих число грамм-молей вещества, растворённого в литре раствора (моль/л):

$$M_1 = C_1 / (\mu \cdot 1000), \quad (7.1)$$

где μ – молекулярная масса вещества;

- моляльностях (M_2), показывающих число молей (грамм-молекул) вещества, содержащегося в 1000 г растворителя (г-моль/кг);

- нормальностях (N), показывающих число грамм-эквивалентов вещества, содержащихся в литре раствора (Н)

$$N = C_1 / (1000 \text{ Э}), \quad (7.2)$$

где \mathcal{E} – эквивалентная масса, $\mathcal{E} = \mu/n$;

n – грамм-атомов водорода.

Грамм-эквивалентом вещества называется количество вещества в граммах, соответствующее в данной реакции одному грамм-атому водорода или перехода одного электрона;

5) для электролитов применяется единица измерения концентрации г-ион/л,

$$C = C_1/A ,$$

где A – атомная масса вещества.

б) несистемные единицы:

pt – промиле (одна часть вещества на 1 тыс. частей раствора);

ppm – пропромиле (одна часть вещества на 1 млн. частей раствора);

F^0 – французский градус ($1F^0 = 10 \text{ мг CaCO}_3$ в одном литре воды).

Определение концентрации может быть выполнено следующими методами:

- весовым;
- объёмным;
- колориметрическим;
- пламя-фотометрическим;
- кондуктометрическим (по удельной электропроводности);
- потенциометрическим (ион-селективными электродами).

На точность выполнения анализов в значительной мере влияет правильный отбор проб. При этом необходимо учитывать:

- равномерность распределения анализируемого вещества по потоку;
- концентрацию анализируемого вещества в растворе.

При определении концентрации весовым методом необходимо учитывать:

- что вещество или элемент выделяют тем или иным способом в форме соединения, имеющего определённый химический состав;
- влияние кристаллизуемой влаги в веществе;
- концентрацию вещества в соотношении с точностью взвешивания;
- температуру высушенного вещества.

Объёмный метод основан на проведении в анализируемом растворе такой реакции, момент завершения которой может быть зафиксирован тем или иным способом. При этом необходимо учитывать:

- свойства индикатора и делать поправку на индикатор;
- прибегать к предварительному концентрированию или разбавлению раствора; для чего прибегать к предварительному определению концентрации;
- использовать титранты, приготовленные из специальных навесок (фиксаналов), или проверять по фиксаналам приготовленные взвешиванием титранты и вводить поправочные коэффициенты.

Колориметрический метод основан на измерении интенсивности окраски, которую создаёт то или иное вещество с определяемым веществом.

Определение концентрации производится визуально или фотоэлектроколориметрами по стандартной шкале раствора.

Пламя-фотометрический метод основан на возбуждении атомов определяемого элемента действием высокой температуры. Возбуждённые атомы, возвращаясь в невозбуждённое состояние, излучают свет определённой спектральной характеристики, присущей данному элементу, который отфильтровывается от других светофильтрами, а его интенсивность измеряется фотоэлементом или фотосопротивлением. До выполнения анализов выполняют тарировку прибора по стандартным растворам, т. к. интенсивность излучения зависит также и от температуры пламени, количества раствора, попадающего в пламя и других факторов.

Кондуктометрический метод основан на изменении электропроводности электролитов в зависимости от концентрации вещества. Электропроводность измеряется в См*см (Сименс*см) ($C_m = 1/O_m = O_m^{-1}$).

При измерении концентрации кондуктометрическим методом на точность измерений влияют:

- температура раствора;
- соединительные провода, в т. ч. конструкция ячейки;
- состав ионов, т. к. различные ионы имеют различную подвижность. То есть этот метод рекомендуется применять для определения концентрации «чистых» растворов и сильно разбавленных.

Потенциометрический метод основан на селективном (избирательном) действии электродов, пропускающих только один вид ионов. При этом на электродах (основном и вспомогательном в зависимости от концентрации) возникает разность потенциалов. Так как этим методом измеряют низкие концентрации, которые неудобно выражать в г-ионах/л, то эти концентрации представляют в логарифмических единицах с обратным знаком, т. е.

$$- \lg C_{H^+} = pH; \quad - \lg C_{OH^-} = pOH; \quad - \lg C_{Na^+} = pNa \text{ и т. д.}$$

7.3.3 Датчики

Датчики (первичные преобразователи) – это элементы автоматики, служащие для получения необходимой информации о реальном состоянии объекта регулирования. С их помощью осуществляется обратная связь системы регулирования с объектом по каждому параметру. Поэтому датчики удобно классифицировать по физическому параметру, по которому осуществляется эта связь, например, датчик температуры, давления или влажности.

Часто под датчиком понимается конструктивно оформленный блок, состоящий из первичного и вторичного преобразователей. Первичный преобразователь – это чувствительный элемент, так называемый сенсор. Вторичный

преобразователь обеспечивает унифицированный выходной электросигнал, позволяющий осуществить связь датчика с принимающими его сигналами элементами системы автоматики. Примером могут служить датчики с унифицированными диапазонами сигналов по напряжению от 0 до 10 В или по току от 4 до 20 мА. Это датчики с аналоговым выходным сигналом, широко применяемые на практике.

Помимо них также используются датчики двухпозиционные (релейного типа), срабатывающие при достижении заданной контролируемой величины, сама же контролируемая величина, так называемая уставка, задается органом регулирования на самом датчике. Например, о необходимости замены кассеты воздушного фильтра может сигнализировать дифференциальный датчик давления (дифманометр) с точками измерения давления до и после фильтра. Срабатывание произойдет, когда его аэродинамическое сопротивление возрастет до максимально допустимой величины, зафиксированной уставкой.

Все датчики должны пройти предмонтажную проверку (тест) на соответствие паспортным данным. Обязательной является также периодическая метрологическая поверка датчиков (проверка на соответствие характеристик точности, указанных в паспорте). Это требование Госстандарта касается вообще всех средств измерения.

Паспортные данные, как правило, содержат информацию о конструктивных особенностях датчика, о точности и пределах измерения. Кроме того, к каждому датчику должны прилагаться схемы подключения к регулятору, список дополнительных аксессуаров и руководство по эксплуатации.

Выбор датчика осуществляется по условиям эксплуатации, диапазону и требуемой точности измерения физического параметра.

Датчики температуры. Для измерения температуры могут применяться как контактные приборы (имеющие в своем комплекте ряд различных

зондов – термопар или термометров сопротивления, позволяющих измерять температуру поверхностей, газов и жидкостей), так и приборы для бесконтактного (дистанционного) измерения (пирометры).

Датчики давления. Датчики давления подразделяются на реле давления и аналоговые датчики давления. Те и другие могут измерять давление как в одной точке, так и разность давлений в двух точках, так называемые дифференциальные датчики давления.

Характерным примером использования реле давления является их применение для защиты трубопроводов и аппаратов от чрезмерно низкого или высокого давления жидкости.

Аналоговые датчики позволяют определять величину давления в точке измерения. Вторичный преобразователь датчика конвертирует измеренное давление в электрический сигнал.

Дифференциальные датчики давления используются для измерения перепадов давления на фильтрах, насосах и т. д. Дифференциальные датчики давления имеют два отдельных канала подключения. Замер давления в вакуумной линии осуществляется при использовании канала низкого давления в приборе, замер давления в линии высокого давления – при использовании канала высокого давления. Замер перепада давления фильтров, насосов – при использовании обоих каналов.

Выбранное место для монтажа не должно подвергаться вибрациям. Пространственное расположение датчика необходимо выполнять в соответствии с паспортными данными (например, монтаж датчика только на вертикальных участках трубопровода).

Датчики потока. Датчики потока работают следующим образом. Сначала измеряется скорость движения жидкости или газа (в том числе пара или воздуха) в трубопроводе или воздуховоде. Измеренный сигнал преобразуется во вторичном преобразователе в электрический, а затем в вычислительном

блоке (чаще всего в микропроцессорном контроллере) рассчитывается расход жидкости или газа с учетом сечения канала.

Эти приборы различаются по принципу действия, технико-экономическим показателям и эксплуатационным качествам.

По принципу действия первичных преобразователей они делятся на: сужающие устройства; а также лопастные, турбинные, роторные, вихревые, электромагнитные и ультразвуковые.

Счетчики, основанные на сужающих устройствах, имеют самые низкие потребительские свойства из-за малой точности, большой потери давления и необходимости ежегодной поверки с демонтажем с трубопровода. Лопастные, турбинные, роторные и вихревые счетчики также имеют недостатки, характерные для механических приборов и связанные с быстрым износом трущихся поверхностей, низкой надежностью, подверженностью коррозии, осаждением механических частиц, а также большой потерей давления. Электромагнитные счетчики, в свою очередь, весьма чувствительны к проводимости измеряемой среды, что приводит к нарастанию ошибки измерения. Ультразвуковые счетчики на сегодня являются наиболее эффективными приборами для измерения расходов в трубах диаметром от 50 до 250 мм. Эти приборы, кроме высокой точности измерения, имеют небольшое гидравлическое сопротивление. Межповерочный интервал составляет 2 – 3 года, причем поверка может производиться без демонтажа с трубопровода. Однако соответственно и цены на этот тип датчика потока существенно выше.

Датчики состояния фильтров. Состояние фильтров (окончание проведения основных операций – фильтрование и регенерация) определяются кондуктометрическим методом по дифференциальному измерению электропроводности потока на входе в фильтр и на выходе из него или по величине *pH*. В качестве датчиков применяются измерительные проточные ячейки с электродами.

7.3.4 Система автоматизации и контроль производственных процессов

После истощения фильтра (после использования его рабочей емкости) он отключается от рабочей магистрали и переводится в режим восстановления рабочей способности, который, как правило, является сложным многооперационным процессом. Установка считается частично автоматизированной, если процесс регенерации осуществляется без вмешательства оператора, который осуществляет две команды: «регенерация», «работа». В разработанной схеме автоматизации фильтры включены в технологическую схему, которая имеет с точки зрения работы насосов и арматуры два указанных положения – работа и восстановление. В схеме установлено два насоса (рабочий и регенерационный) и автоматический регенерационный узел, включающий самонаполняющийся бак-измеритель и устройство (поплавковый затвор), отмеряющее заданную порцию регенерационного раствора, отсекающего его, после чего операция регенерации переходит в операцию отмывки. Система автоматизации снабжена сигнализаторами окончания процессов работы и восстановления. Измерение расхода осуществляется при помощи стандартных сужающих устройств (диафрагм), сигнал от которых (перепад давления) передается на указатель расхода и сумматор, определяющий количество обработанной воды.

Лекция 8. ВОДНОХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ОБЪЕКТОВ ТГВ

Лекция 8

8.1 Обработка котловой воды

Нормы качества котловой воды устанавливаются с целью предотвращения отложений и коррозии в тракте котла.

В паровых котлах наиболее прочную накипь образует $CaSO_4$. С целью предотвращения этого в котлах с давлением до 1,6 МПа поддерживают щелочной режим. При этом происходит распад бикарбоната натрия и выпадение в осадок $CaCO_3$, который при фосфатировании образует шлам, не образующий накипи и легко удаляемый с продувкой. При более высоком давлении щелочение не помогает избавиться от накипи. Поэтому применяют чисто фосфатный режим.

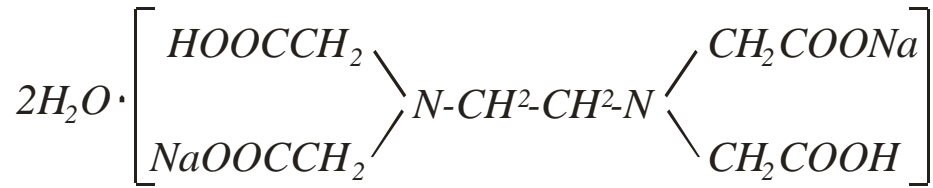
Основные отложения образуют соединения железа.

Для обеспечения необходимого уровня содержания железа в питательной воде предусматривается комплекс мероприятий:

- использование известкования или коагуляции на предочистке. При любом начальном содержании соединений железа они снижаются до 50 мкг/кг;
- применение двухступенчатого Na -катионирования;
- аминирование потока пара и питательной воды (добавление раствора аммиака или сульфата аммония в питательную воду, содержание аммиака не более 1000 мкг/кг из-за коррозии медных сплавов);
- pH питательной воды на уровне 8,5 – 10,0;
- термическая деаэрация, обеспечивающая глубокое обескислороживание;
- трилонирование, с целью удаления железистых соединений.

Комплексообразователи создают условия, при которых примеси остаются или в растворённом состоянии или в виде тонкой взвеси, не прикипаю-

щей к поверхности нагрева и удаляемые с продувкой. Комплексообразователь трилон Б (динатриевая соль этилендиаминотетрауксусной кислоты)



применяется до температуры 250 – 270 °С.

Натриевые соли фосфорной кислоты (Na_3PO_4 , Na_2HPO_4) при введении в котёл фосфатируют кальций, образуя тончайший шлак $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)$.

Нормы качества котловой воды паровых котлов по общему солесодержанию принимаются по данным завода изготовителя.

Нормы относительной щелочности введены как средство борьбы со щелочной хрупкостью металла барабанов (интеркристаллитная коррозия), которая возникает при сочетании трёх факторов: местные напряжения в металле (клёпка, вальцовка, сварка); воздействие высоких концентраций щелочи; отсутствие пассиваторов.

Так как трилон Б дорог и дефицитен, то чаще применяют фосфатирование. Полифосфаты являются потенциально кислыми солями. Их применение допустимо для котлов с повышенной щелочностью котловой воды (более 6 мг экв/кг в солевом отсеке).

При фосфатировании устанавливаются нормы качества котловой воды указанные в таблице 8.1.

В последнее время активно применяются противонакипные и антикоррозионные реагенты – комплексоны ОЭДФ-Zn и НТФ-Zn. Предлагаемая технология обработки воды позволяет эксплуатировать без дополнительной обработки:

- паровые и водогрейные котлы;
- теплообменное оборудование;

- наружные и внутридомовые тепловые сети;
- производить отмывку ранее образовавшейся накипи и отложений при нормальной работе оборудования.

Таблица 8.1 – Нормы качества котловой воды

Режим фосфатирования	Доля $NaOH$ в общем солевом содержании, %	Содержание фосфатов PO_4^{3-} , мг/кг		
		Бесступенчатое испарение	Ступенчатое испарение	
			Чистый отсек	Солевой отсек
Обычный:				
а) щелочно-солевой	10	5 – 15	5 – 10	<75
б) чистофосфатной щелочности	отсутствует			
Пониженного избытка фосфатов:				
а) щелочно-солевой	10	1 – 5	1 – 5	<30
б) чистофосфатной щелочности	отсутствует			

8.2 Определение необходимой продувки котла и способы ее уменьшения

В барабанных котлах для поддержания требуемого значения солевого содержания и удаление шлама применяется *продувка*. Продувка бывает периодическая и непрерывная. Расчет величины продувки может быть выполнен на основе балансовых уравнений:

$$D_{n.в.} = D_n + D_{np};$$

$$C_{n.в.} D_{n.в.} = C_n D_n + C_{к.в.} D_{np}. \quad (8.1)$$

т. к. растворимость примесей в паре незначительно, то можно считать $C_n D_n \approx 0$, тогда:

$$C_{n.в.}(D_n + D_{np}) = C_{к.в.}D_{np} \text{ или } C_{n.в.}D_n = C_{к.в.}D_{np} - C_{n.в.}D_{np}.$$

$$D_{np} = \frac{C_{n.в.} \cdot D_n}{C_{к.в.} - C_{n.в.}}, \text{ а } p = \frac{C_{n.в.}}{C_{к.в.} - C_{n.в.}} \cdot 100 \%, \quad (8.2)$$

где $C_{н.в.}$, C_n и $C_{к.в.}$ – концентрация примесей в питательной воде, паре и котловой воде;

$D_{н.в.}$, D_n , D_{np} – количество питательной воды, паропроизводительность, величина продувки;

p – процент продувки.

Непрерывную продувку целесообразно применять при $p = 2 \%$ (при меньшей величине продувки экономически невыгодно устанавливать оборудование для непрерывной продувки). Величина непрерывной продувки должна быть не более:

10 % – для котлов низкого давления ($P_{раб} < 1,4$ МПа);

5 % – для котлов среднего давления ($P_{раб} < 4$ МПа).

Для небольших котельных (производительностью менее 20 т/ч), если тепло продувочной воды (пара и воды) может быть использовано в тепловой схеме котельной (такая возможность имеется в котельных, где возврат конденсата не превышает 50 %) экономически целесообразно увеличить продувку до 20 %. По условиям надёжности циркуляции такой размер продувки допустим для всех котлов, кроме котлов с выносными циклонами.

Пар, отделяемый в сепараторе (расширителе продувки), направляется в деаэратор, а продувочная вода из расширителя подаётся на ВВП добавочной воды. Концентрат используется для регенерации фильтров.

Режим периодической и непрерывной продувки производят согласно режимной карте, разработанной наладочной организацией и утвержденной администрацией, при этом производится подпитка котла до верхнего уровня.

Качество пара, вырабатываемого котлом, устанавливается требованиями потребителя. Для котлов с естественной циркуляцией и давлением до 4 МПа:

натрий, Na^+ , мкг/кг – 100;

углекислота, CO_2 , мг/кг – 20;

кремнекислота SiO_3^{2-} , мкг/кг – не нормируется.

С целью обеспечения требуемой чистоты пара при снижении величины продувки применяется *ступенчатое испарение*. (Котлы производительностью более 10 т/ч и выше изготавливаются со ступенчатым испарением). Схема ступенчатого испарения представлена на рисунке 8.1.

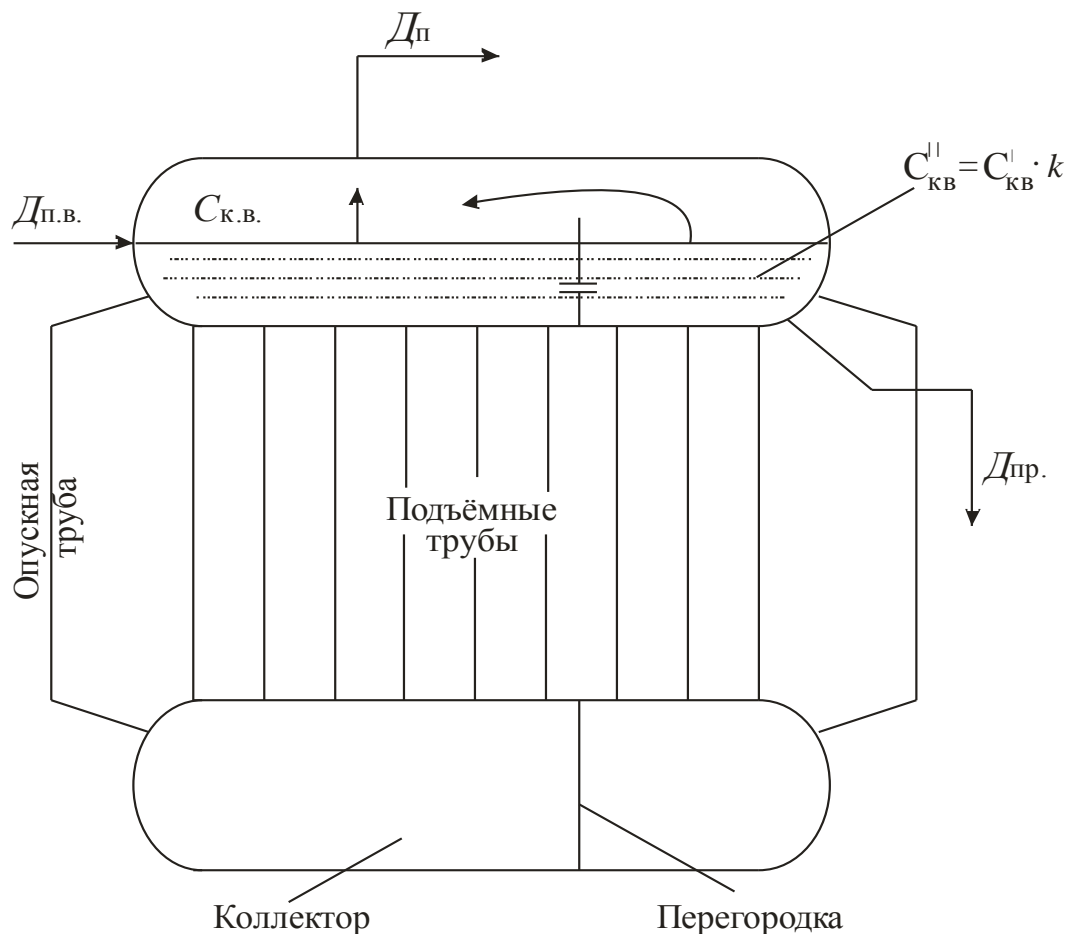


Рисунок 8.1 – Схема ступенчатого испарения

Относительная паропроизводительность солевого отсека:

$$n = p_{\max} (k - 1). \quad \left(n = \frac{D''}{D_n} \cdot 100 \% \right). \quad (8.3)$$

Пар чистого отсека чище, чем пар парогенератора бесступенчатого испарения, а пар солевого отсека имеет такое же качество. Таким образом, в целом качество пара лучше.

Кроме ступенчатого испарения применяют и другие методы улучшения качества пара:

- установка внутри барабана сепарационных устройств: перегородок, жалюзи, дырчатых (паропромывных) листов, внутрициклонных инерционных сепараторов. Эти устройства уменьшают вспенивание воды и унос брызг;

- промывка пара питательной водой (т. к. питательная вода имеет более низкую концентрацию солей, чем котловая вода, то пар, проходя через питательную воду, очищается). Подвод питательной воды осуществляется при помощи трубы с отверстиями на дырчатый желоб;

- очистка пара в выносных циклонах.

Принцип работы циклона (рисунок 8.2) основан на отделении жидкости от пара за счет центробежных сил. Продувка осуществляется из циклона.

С целью сокращения потерь тепла и конденсата, в тепловой схеме котельной применяется расширитель продувки, схема которого приведена на рисунке 8.3. Котловая вода (продувка котла) поступает в расширитель, давление в котором ниже, чем давление в барабане котла и, вследствие этого, происходит вторичное вскипание перегретой жидкости. Образующийся вторичный пар отводится на деаэратор, а оставшаяся продувочная вода с более низкой энтальпией через теплообменник подогрева исходной воды сбрасыва-

ется в канализацию или используется для приготовления регенерационного раствора.

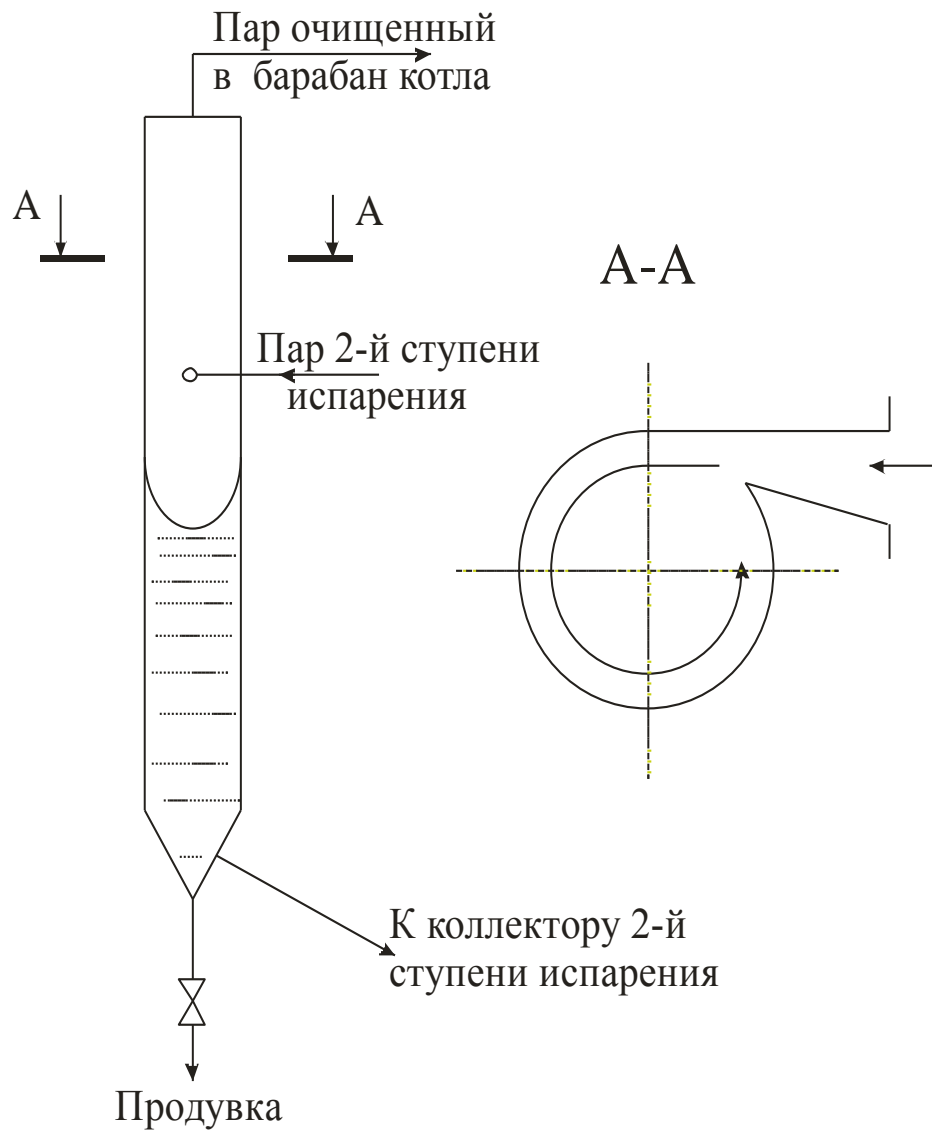


Рисунок 8.2 – Схема циклона котла

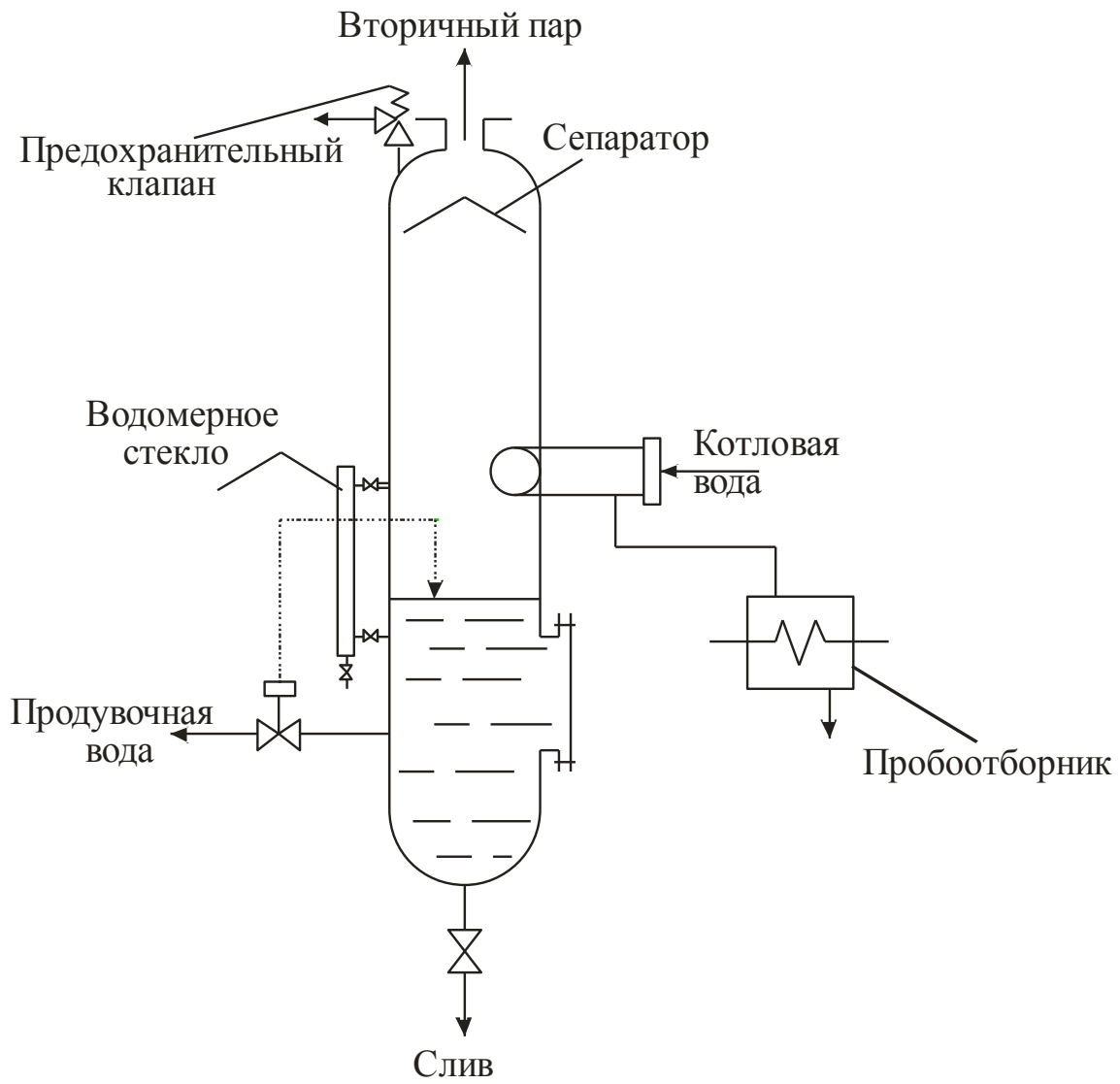


Рисунок 8.3 – Расширитель продувки

9. ПРОГРЕССИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ВОДЫ И ОБОРУДОВАНИЕ ВПУ

Лекция 9

9.1 Фильтры непрерывного действия

9.1.1 Новые методы регенерации

Получить хорошее качество обработанной воды позволяет метод **противоточной регенерации**:

а) регенерация «снизу – вверх» (отмывка ионита двойная: первая «снизу – вверх», вторая «сверху – вниз», истощение – «сверху – вниз»);

б) регенерация «сверху – вниз» (отмывка «сверху – вниз», истощение «снизу – вверх»).

Взрыхление может производиться один раз в 3 – 4 цикла.

При этом резко сокращается расход реагентов, обработку можно вести по схеме одноступенчатого *Na*-катионирования.

Ступенчато – противоточная регенерация. Регенерационный раствор сначала подаётся на последнюю ступень, а затем на первые. В пределах одной ступени регенерация прямоточная.

Противоточные фильтры с «зажатым» слоем отличаются от параллельных тем, что имеют средний дренаж аналогичный нижнему, над которым засыпается слой ионита высотой 0,4 м, выполняющего функцию механического фильтра и предохраняют щели верхнего дренажа от засорения. При регенерации раствор и отмывочная вода подаются «снизу – вверх» и отводятся через средний дренаж. Одновременно сверху подаётся «блокирующий» поток, предохраняющий слой от взрыхления. Отмывка верхнего слоя (над дренажного) сверху с отводом отмывочной воды от среднего дренажа.

Повторное использование регенерационного раствора. Необходим бак для сбора регенерационного раствора. (Лучше, если несколько баков, в

которые по мере «загрязнённости» собирают регенерационный раствор). Можно использовать бак-мерник или солевую яму. Наиболее полно отработанный раствор используется для взрыхления ионита.

Повышение концентрационного напора (снижение степени разбавления регенерационного раствора в фильтре). Достигается сливом объёма воды из «водяной подушки» фильтра до уровня слоя.

Использование продувочной воды для приготовления регенерационного раствора.

Отмывка ионита. Отмывка производится для удаления из ионита остатков продуктов регенерации и остатков регенерационного раствора. (Отмывку контролируют по «хлору»). Отмывка первой ступени производится исходной водой, а второй – *Na*-катионированной водой после первой ступени.

9.1.2 Установки непрерывного действия с движущимся слоем ионита

Установки непрерывного действия с движущимся слое ионита по направлению движения ионита по отношению к обрабатываемой воде и реагенту можно разделить на 3 группы: противоточные, параллельноточные и взаимопересекающиеся.

Противоточные установки бывают двух типов:

1. Установки с гравитационной системой перемещения ионита сверху вниз, а обрабатываемая вода подаётся снизу вверх. Наиболее распространены установки такого типа, выпускаемые фирмами США по лицензии японской фирмы «Асахи» – «Гравер» и «Дегремон». Данный способ непрерывного ионного обмена осуществляется с помощью трёх колонн (рисунок 9.1): адсорбционной (1), регенерационной (2) и промывной (3). Верхние зоны этих колонн соединены с бункерами для ионита (4), а нижние зоны посредством клапанов соединены с приёмниками ионита (5), которые предназначены для гидрперегрузки ионита. Жидкость, подаваемая в каждую из колонн, посту-

пает в нижнюю зону, проходит через колонну, контактируя с ионитом, и выходит из верхней зоны. Одновременно с этим ионит, находящийся в приёмниках ионита, перемещается в бункер следующей колонны давлением воды. По истечении определённого времени подача жидкости в колонны и транспортировка ионита приостанавливаются, открываются верхние и нижние клапаны колонн, и ионит, находящийся в бункерах, под действием силы тяжести перемещается в колонны. Одновременно из колонн в приёмники ионита перемещаются точно такие же количества ионита. Клапаны после этого закрываются, и процесс продолжается.

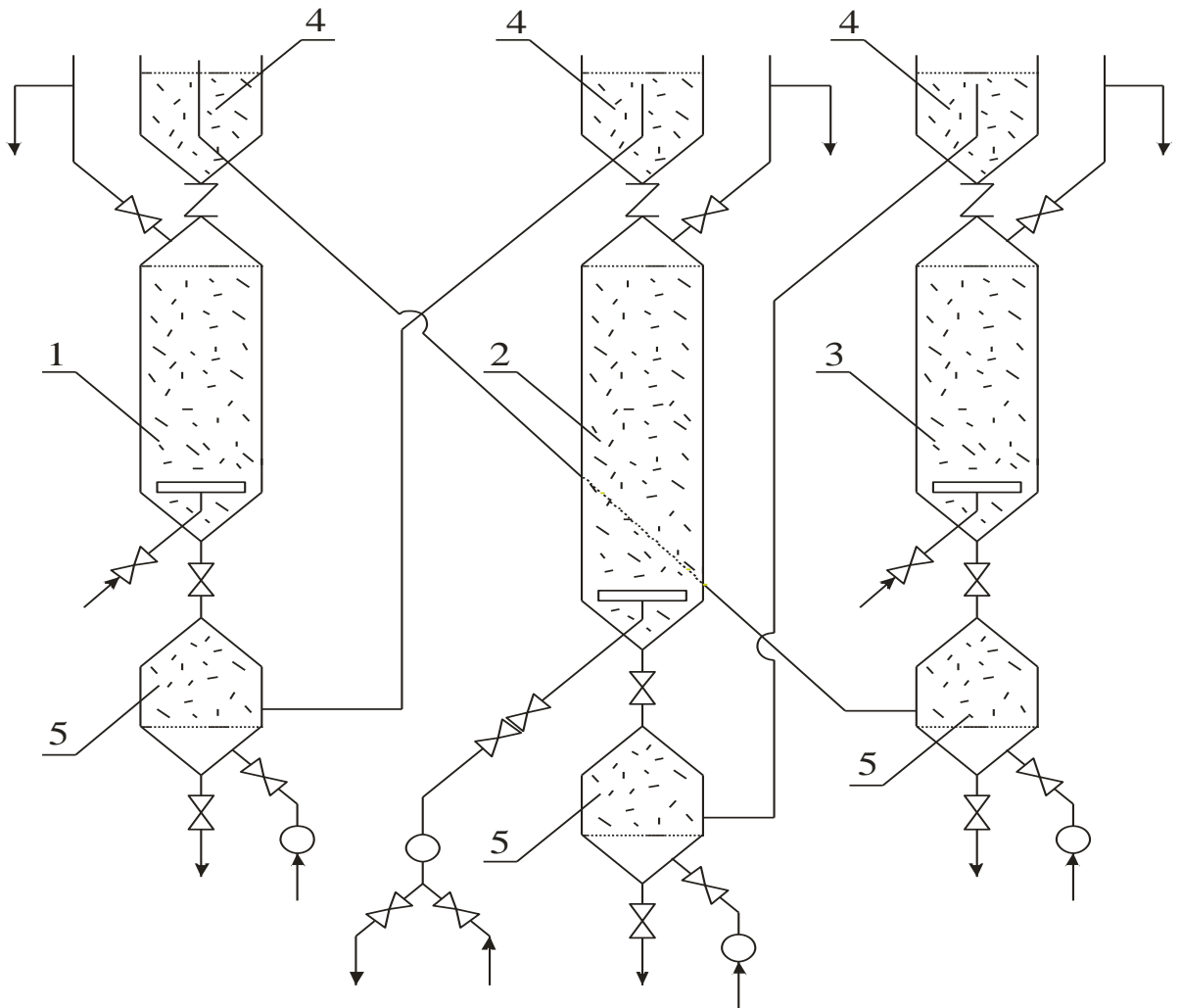


Рисунок 9.1 – Усовершенствованный способ «Асахи»

Ещё одним из приёмов установок с гравитационным перемещением смолы навстречу потоку жидкости, является аппарат Стантона (рисунок 9.2).

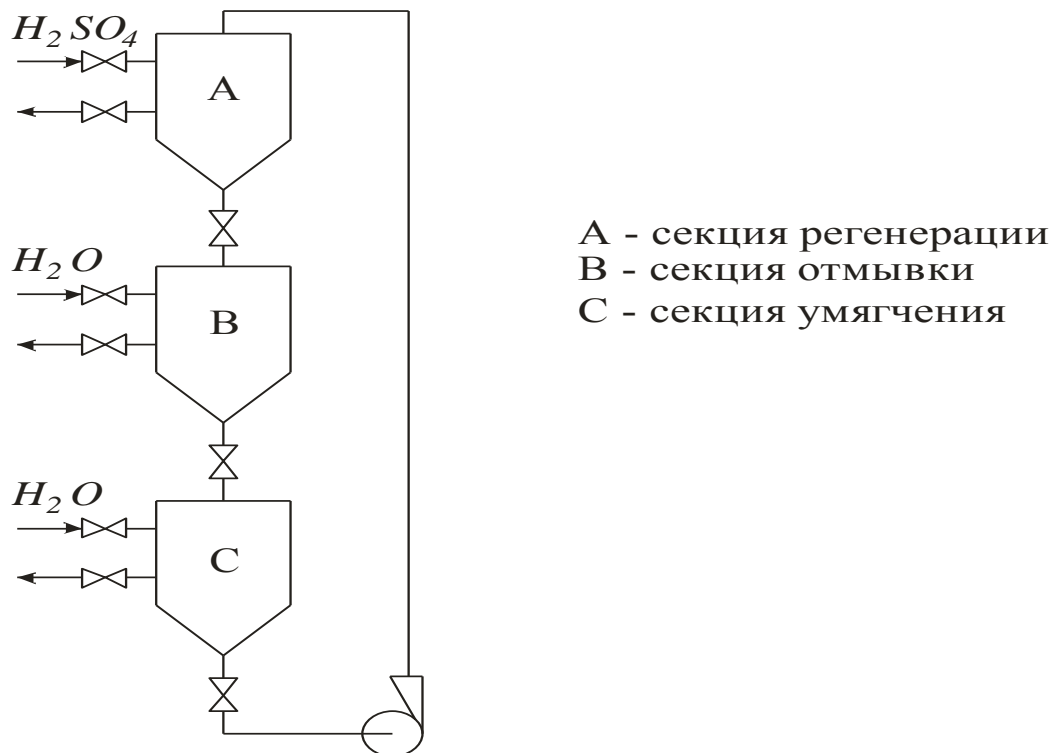


Рисунок 9.2 – Схема аппарата Стантона

Аппарат состоит из трёх секций, расположенных одна на другой. Ионит из одной секции в другую перемещается через специальные вращающиеся краны.

Практика использования установок с «взвешенным» слоем ионита показала ряд серьёзных недостатков:

- перемешивание зёрен ионита в слое и неравномерное распределение потока воды или раствора через слой ионита;
- ограничение скорости фильтрования;
- возможность проскока солей жесткости;
- опасность выноса смолы.

1. Установки с принудительной системой, когда ионит перемещается снизу вверх, а обрабатываемая вода – сверху вниз. Промышленное распространение получила установка такого типа, запатентованная Хаггинсом. Фильтры являются полунепрерывными, т. к. при перемещении порций иони-

та выработка воды прекращается. Установки этого типа имеют гидравлически зажатый слой, что устраняет многие недостатки, присущие аппаратам с «взвешенным» слоем ионита.

Установки с параллельным движением ионита относительно обрабатываемой воды и регенерационного раствора так же можно разделить на две группы:

а) установки с гравитационной системой перемещения ионита;

б) установки с принудительной системой перемещения ионита, когда вода и ионит движутся снизу вверх, как, например, в аппарате, запатентованном Дорном. Аппарат Дорна состоит из двух колонн – рабочей и регенерационной. Эти колонны установлены в емкости и соединены с ней. В рабочей колонне вода перемещается с ионитом при помощи эжектора, а в регенерационной колонне перемещается по системе колпачковых насадок, увеличивая тем самым время контакта зерен ионита с регенерационным раствором.

Характерными недостатками этих установок являются:

- значительное истирание ионита;
- неполная регенерация и невозможность регулирования процесса регенерации.

Известны аппараты, в которых сочетаются признаки противотока и параллельного тока, работающие по системе «Флюикон».

В установках со взаимопересекающимися перемещением воды и ионита ионит перемещается сверху вниз, а обрабатываемая вода – поперек. Типичный аппарат такого типа запатентован Лажутте.

В связи с разработкой новых ионообменных материалов были разработаны аппараты с применением негранульных ионообменных материалов:

- установки с использованием волокон;
- установки с использованием губчатых материалов;
- установки с использованием непрерывной ленты.

Установки с использованием непрерывной ленты (рисунок 9.3) имеют три последовательно расположенных резервуара, различной емкости, через которые движется бесконечная ионообменная лента. Известны установки, которые работают с применением ленты, но в сорбционном резервуаре, в котором происходит деминерализация воды, через камеру сорбции одновременно проходят две ленты: катионообменная и анионообменная, после чего каждая лента направляется на соответствующую регенерацию.

Недостатком этих установок является то, что они безнапорные и имеют низкую скорость фильтрования. Основная трудность в создании напорных фильтров заключается в том, что трудно осуществить герметичность отсеков при движущейся ленте. Другая не менее трудная задача – создание механизма передвижения ленты, сводящего к минимуму истирание ленты.

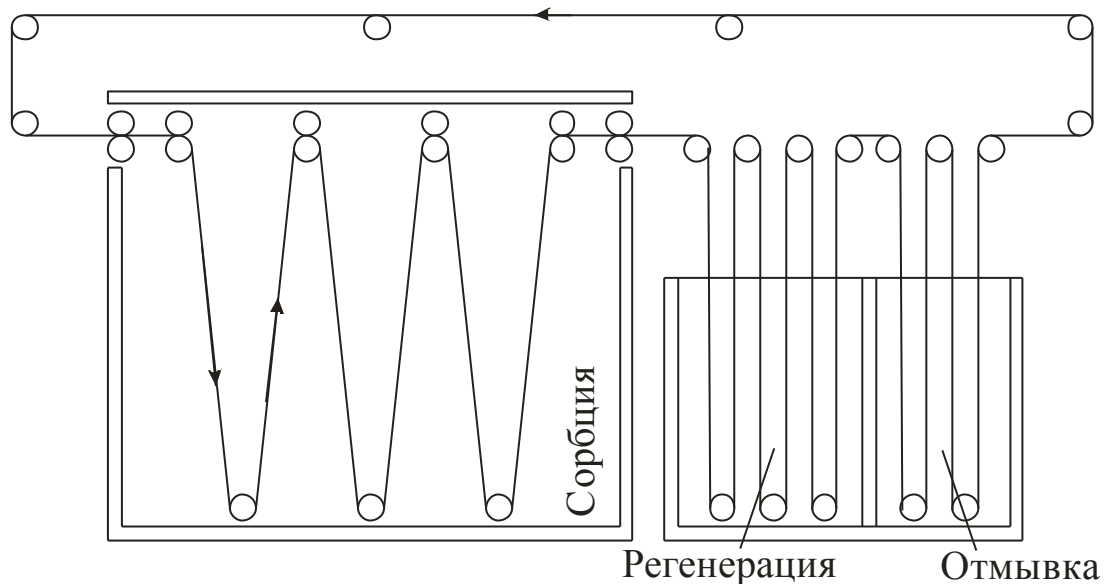


Рисунок 9.3 – Схема установки с использованием непрерывной ленты

К этому же типу установок можно отнести и установки с перемешиванием фиксированных объемов ионита, в которых используются встречные перемещения потоков растворов и ионита, заключенного в фиксированный объем. Ионит может перемещаться в ковшах, контейнерах, на конвейерной ленте или находиться в движущемся пористом шланге. Схема такой установ-

ки аналогична схеме установки, изображенной на рисунке 9.3, с той лишь разницей, что лента сама не является ионообменной, а на ней укрепляют ковши или контейнеры. Установки имеют те же недостатки, что и установка, описанная выше.

Установки непрерывного действия с движущимся слоем ионита, кроме отдельных недостатков, присущей каждой из них в отдельности, имеют общие для всех недостатки:

- повышенный износ ионита, который доходит до 10 % и более, против 1 – 3 % в установках с подвижным слоем ионита. Повышенный износ ионита объясняется не только механическим его истиранием, но и является следствием более интенсивной работы ионита из-за увеличения числа циклов перехода ионита из одной формы в другую. В связи с этим ионообменные материалы, применяемые в установках непрерывного действия, должны иметь повышенную механическую и осмотическую прочность, а также повышенную кинетику. Ряд макропористых смол, отвечающих требованиям к установкам непрерывного действия с движущимся слоем ионита, созданы фирмами «Диа-Прозим» (Франция) и «Зеролит» (Англия). Из отечественных смол этим требованиям в наибольшей степени удовлетворяет катионит КУ-23;

- низкая надежность систем автоматического управления в связи с неблагоприятными условиями их эксплуатации (высокая влажность, агрессивные реагенты и т. д.), а также в связи с тем, что при работе установок возникают колебания в составе воды и необходимо изменение скорости подачи смолы, которая находится в виде суспензии, а это сопряжено с известными трудностями, иначе же произойдет движение обменной зоны. Для устранения этого эффекта необходимо изменять скорость перемещения смолы, что связано в свою очередь с изменениями скорости перемещения смолы в зоне регенерации и зоне отмывки. Приборы автоматического контроля и исполнения имеют при этом высокую частоту переключений, что приводит к ее

быстрому износу, т. е. увеличиваются эксплуатационные расходы и расходы на ремонт.

9.1.3 Установки непрерывного действия с неподвижным слоем ионита

Установки непрерывного действия с неподвижным слоем ионита не требуют применения специальных ионообменных аппаратов, т. е. процесс непрерывного ионирования может осуществляться в обычных фильтрах с применением обычных ионообменных материалов, имея те же преимущества перед фильтрами периодического действия, что и все установки непрерывного действия.

К установкам с неподвижным слоем ионита относятся запатентованные Дружо и Лафужем; Броуфтоном и Герфольдом; Шацки; установка фирмы Пермутит (США).

Установка Дружо и Лафужа состоит из нескольких неподвижных корпусов с неподвижным слоем ионита и имеет вращающийся коллектор, через который периодически осуществляется подача в каждый из корпусов воды, регенерационного раствора, отмывочной и взрыхляющей воды, а также производится отвод умягченной воды и сливы. Недостатком этой установки является, как уже отмечалось ранее, сложность изготовления распределительного устройства многоходового крана, надежно обеспечивающего герметичность между потоками вод и растворов.

В США фирмой Пермутит был разработан способ «Progressive Mode» и автоматические приборы для его осуществления. Установка работает непрерывно при неподвижном слое ионита, а также предусмотрена автоматическая работа установки и в режиме периодического действия, что позволяет производить ремонт оборудования без резерва, отключая поочередно по одному фильтру.

Работа установки основана на известных представлениях о распределении ионов и существовании перемещаемой «зоны ионного обмена» в слое

ионита как во время ионирования исходной воды, так и при регенерации ионита. Установка состоит обычно из трех или четырех фильтров, расположенных рядом, снабженными автоматическими запорными клапанами и соединенных между собой по кольцевой схеме. При этом способе работы установки предусматривается использование всей обменной емкости регенерированного ионита, в отличие от недоиспользования части обменной емкости ионита в обычных установках периодического действия, т. к. зона обмена переводится в следующий фильтр, при начале проскока жесткости без отключения предыдущего до его полного истощения.

Последовательность этапов работы трехкорпусной установки показана на рисунке 9.4.

За исходное состояние принято (стадия I):

- взрыхление истощенного ионита в фильтре 1;
- умягчение исходной воды в фильтре 2;
- выдержка частично регенерированного ионита с регенерационным раствором в фильтре 3;

Последующее состояние (стадия II) включает следующие операции:

- ввод исходного регенерационного раствора в фильтр 3;
- ввод частично отработанного раствора в фильтр 1 из фильтра 3 с последующим сбросом в дренаж;
- продолжение операции умягчения исходной воды в фильтре 2.

Далее на стадии III выполняются операции:

- ввод частично отработанного регенерационного раствора в фильтр 1 из фильтра 3 со сбросом в дренаж;
- отмывка ионита в фильтре 3 после регенерации;
- продолжение операции умягчения исходной воды в фильтре 2.

На стадии IV выполняются следующие операции:

- задержка регенерационного раствора в частично отрегенированном фильтре 1;

- истощение ионита в фильтре 2, работающего первой ступенью умягчения;

- доумягчение воды в фильтре 3, работающего в качестве защитного после фильтра 2.

На стадии V выполняются операции, аналогично операциям выполняемым на стадии I, с той разницей, что фильтры как бы меняются местами:

- фильтр 1 становится на место фильтра 2;

- фильтр 2 – на место фильтра 3;

- фильтр 3 – на место фильтра 1.

Полный фильтроцикл трёхкорпусной установки включает 12 стадий. После чего все стадии повторяются в той же последовательности.

Для полного использования реагента при регенерации используется четырёхкорпусная установка.

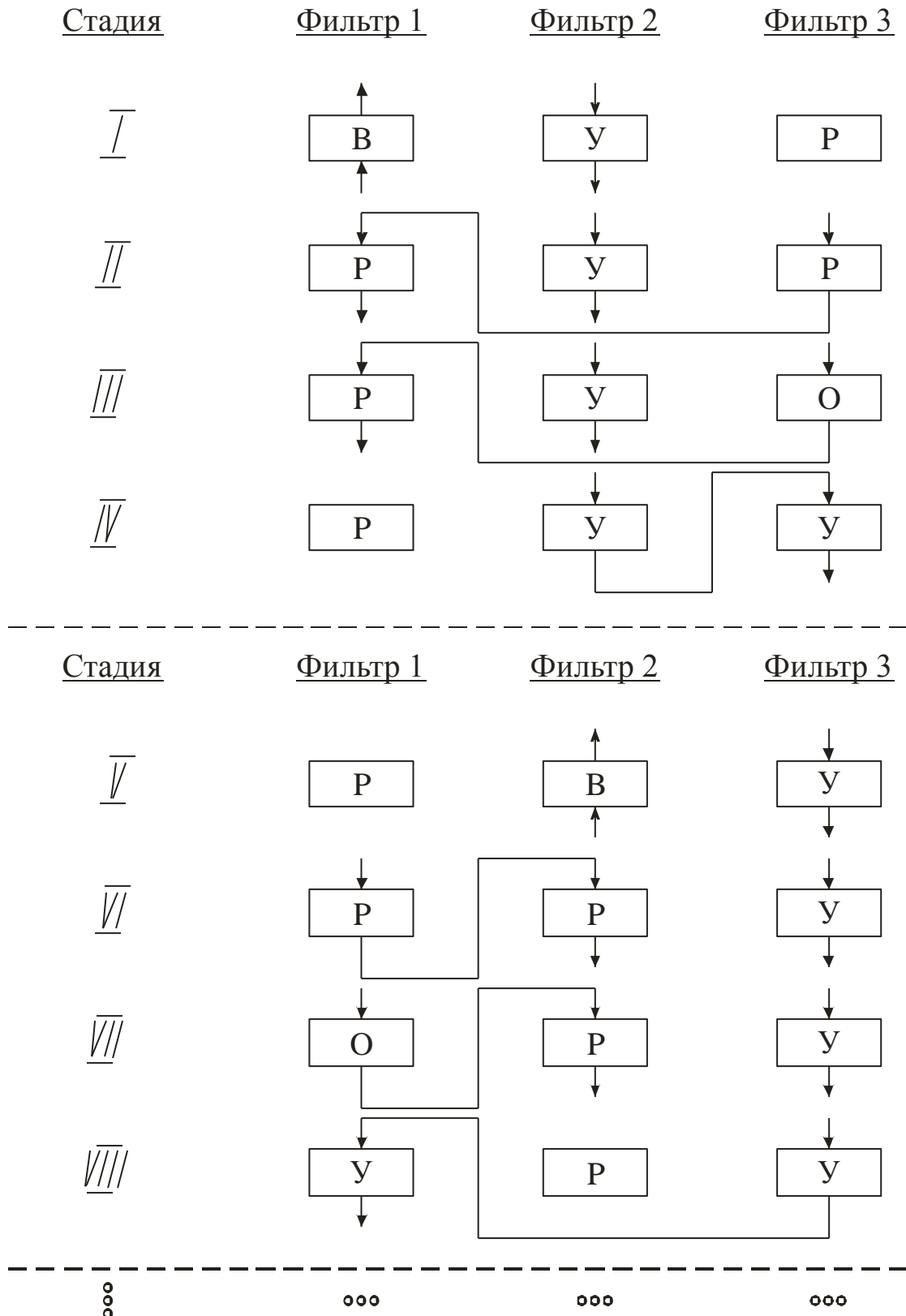


Рисунок 9.4 – Этапы работы трехкорпусной установки

У – умягчение; Р – регенерация; О – отмывка; В – взрыхление

9.2 Термическое умягчение и обессоливание

Основным препятствием для осуществления непосредственного высокотемпературного нагрева воды является, как известно, высокое содержание исходной воды и возникающая при этом опасность солеотложений на поверхностях нагрева теплогенератора.

При низких температурах и давлениях кипения минерализованных вод (меньше 100 °С, вакуум от 50 до 95 %) накипь образуется в основном в виде карбоната кальция $CaCO_3$ и незначительно в виде сульфата кальция $CaSO_4$. Для предварительного осаждения карбонатных ионов CO_3^{2-} и частично ионов кальция Ca^{2+} применяют термоконтактные или термостабилизационные методы, заключающиеся в пропускании подогретой минерализованной воды через фильтр, заполненный контактной массой из зерен кристаллов карбоната кальция и сульфата кальция. В результате перенасыщения воды после подогрева до 120 – 160 °С часть ионов жесткости кристаллизуется на зернах контактной массы, и накипеобразование в вакуумных испарителях снижается в несколько раз. Данный метод не получил широкого применения вследствие наличия дорогого и громоздкого оборудования, сложной эксплуатации и невозможности полностью предотвратить накипеобразование в испарителях.

В настоящее время разработан ряд способов обработки воды, включающих глубокое умягчение воды путем ее катионообменной обработки и регенерацией истощенного катионита продувочной водой парогенераторов. Однако большинство парогенераторов ориентировано на использование пресной воды с минерализацией до 1 г/л и общей жесткостью до 10 мг экв/л, поэтому необходимо использовать такие решения, которые обеспечили бы подпитку контура парогенератора деминерализованной опресненной водой. Одним из наиболее экономичных и экологичных методов умягчения является непрерывное многоступенчатое умягчение на основе технологии фильтров непрерывного действия с неподвижным слоем ионита (ФНД). Последняя

обеспечивает более полное использование регенерационного раствора за счет применения ступенчато-противоточной схемы регенерации, а также полное «срабатывание» располагаемой рабочей емкости поглощения ионита в цепи нескольких последовательно включенных фильтров, работающих в режиме истощения. Технология непрерывного умягчения повышает технико-экономические и экологические показатели обработки природных вод любых классов, но наиболее полно эти преимущества выявляются при обработке минерализованных вод, т. к. затраты на обработку возрастают пропорционально увеличению солесодержания и жесткости исходной воды. В существующих технологиях конденсат ТООУ используется для питания парогенератора, а низкопотенциальная теплота сконденсировавшегося вторичного пара из последней ступени испарения сбрасывается в окружающую среду, т. к. его использование экономически не оправдано по причине низкой температуры и недостаточности расхода исходной воды для восприятия теплоты сбрасываемого из последней ступени вторичного пара. Недостатком этих технологий являются безвозвратные потери теплоты. Эти потери могут быть снижены за счет увеличения числа ступеней испарения, но при этом возрастают капитальные затраты, а малый располагаемый температурный перепад не позволяет реально увеличить число ступеней. Проблема опреснения минерализованной глубокоумягченной воды может быть успешно решена при использовании греющего пара такого давления, при котором давление вторичного пара последней ступени испарения будет выше атмосферного. Тогда теплота конденсации вторичного пара последней ступени испарения используется для подогрева исходной воды в тепловой схеме парогенератора. Повышение начальных и конечных параметров вторичного пара увеличивает температурный напор на теплообменниках, что позволяет уменьшить теплопередающую поверхность аппаратов и соответственно их габариты и стоимость, а возможность использовать теплоту пара из последней ступени позволяет снизить число ступеней. Повышение конечных параметров пара мо-

жет быть достигнуто термокомпрессией пара. Повышение начальных параметров пара оценивается термоэкономическим анализом. Анализ теплообменника показывает, что с термодинамической точки зрения надо свести к минимуму температурный напор, т. к. при этом эксергетические потери уменьшаются, но возрастает поверхность нагрева, и поэтому оптимальный вариант (минимум приведённых затрат) будет при довольно больших температурных напорах.

Образующийся в процессе работы ТОО концентрированный раствор упаренных «мягких» солей подается на ХВО для регенерации ионообменных фильтров.

9.3 Схемы ХВО с сокращенными стоками, бессточные схемы

9.3.1 Экологическое совершенствование технологии умягчения пресных вод

Как известно, содово-регенеративный процесс умягчения пресных вод неосуществим, если

$$S_{nv} = \alpha_{ov} (S_{uv} - yJ_k), \quad (9.1)$$

где S_{nv} , S_{uv} – допустимое солесодержание питательной воды и солесодержание исходной воды;

α_{ov} – добавка обрабатываемой воды в питательную систему котла, $\alpha_{ov} = G_{ov}/G_{pv}$;

G_{ov} , G_{pv} – расходы обрабатываемой и питательной воды;

y – снижение сухого остатка обрабатываемой воды, мг/кг, соответствующее 1 мг экв/кг J_k ;

J_k – карбонатная жесткость исходной воды.

Для того чтобы снять это ограничение, в схеме предусматривается установка H -катионитного фильтра, который снижает солесодержание ис-

ходной воды на величину (zK), эквивалентную нарабатываемой в электролизере кислоте. Тем самым доля продувки (φ_l), направляемой на рециркуляцию, может быть увеличена. Так как с величиной продувки связаны потери тепла, то желательно уменьшить величину продувки, а недостаток щелочных реагентов в ней, требуемых для осаждения жесткости исходной воды, компенсируется работой электролизера. Получаемый попутно в анодной камере электролизера анолит используется для регенерации *H*-катионитного фильтра. При недостатке соды для осаждения ионов кальция через воду пропускают CO_2 , для чего используются дымовые газы котельной. При недостатке в исходной воде ионов кальция для полного связывания образующейся соды в результате распада бикарбонат-иона возможны два режима: 1) в осветлитель добавляется часть отработанного регенерационного раствора *Na*-катионитных фильтров; 2) образующийся избыток соды нейтрализуется в *H*-катионитном фильтре. Образующуюся при этом двуокись углерода необходимо удалять в декарбонизаторе или в деаэраторе, предусмотрев для него повышенную нагрузку. Схема обработки природной воды по предлагаемой технологии приведена на рисунке 9.5.

Исходная вода (ИВ) подается в осветлитель (О), и сюда же подается часть продувки (К), предварительно обработанная в электролизере (Э), и осуществляется продувка диоксидом углерода. Образующийся шлам в виде $Mg(OH)_2$ и $CaCO_3$ удаляется с продувкой осветлителя в шламосборник. Умягченная вода из осветлителя пропускается через *Na*-катионитную установку (На), снижающую жесткость воды до значений, обусловленных нормами, а затем проходит обработку в *H*-катионитных фильтрах (Н). После смешивания обработанной воды с конденсатом (ВК) питательная вода подается в котел (Кт), в котором генерируется пар (П). Солесодержание котловой воды поддерживается на требуемом уровне величиной продувки (p). Регенерация *H*-катионитных фильтров производится анолитом (А), образующимся в анодной камере электролизера. Регенерация *Na*-катионитных фильтров про-

изводится отработанным регенерационным раствором H -катионитных фильтров с добавкой $NaCl$ со стороны.

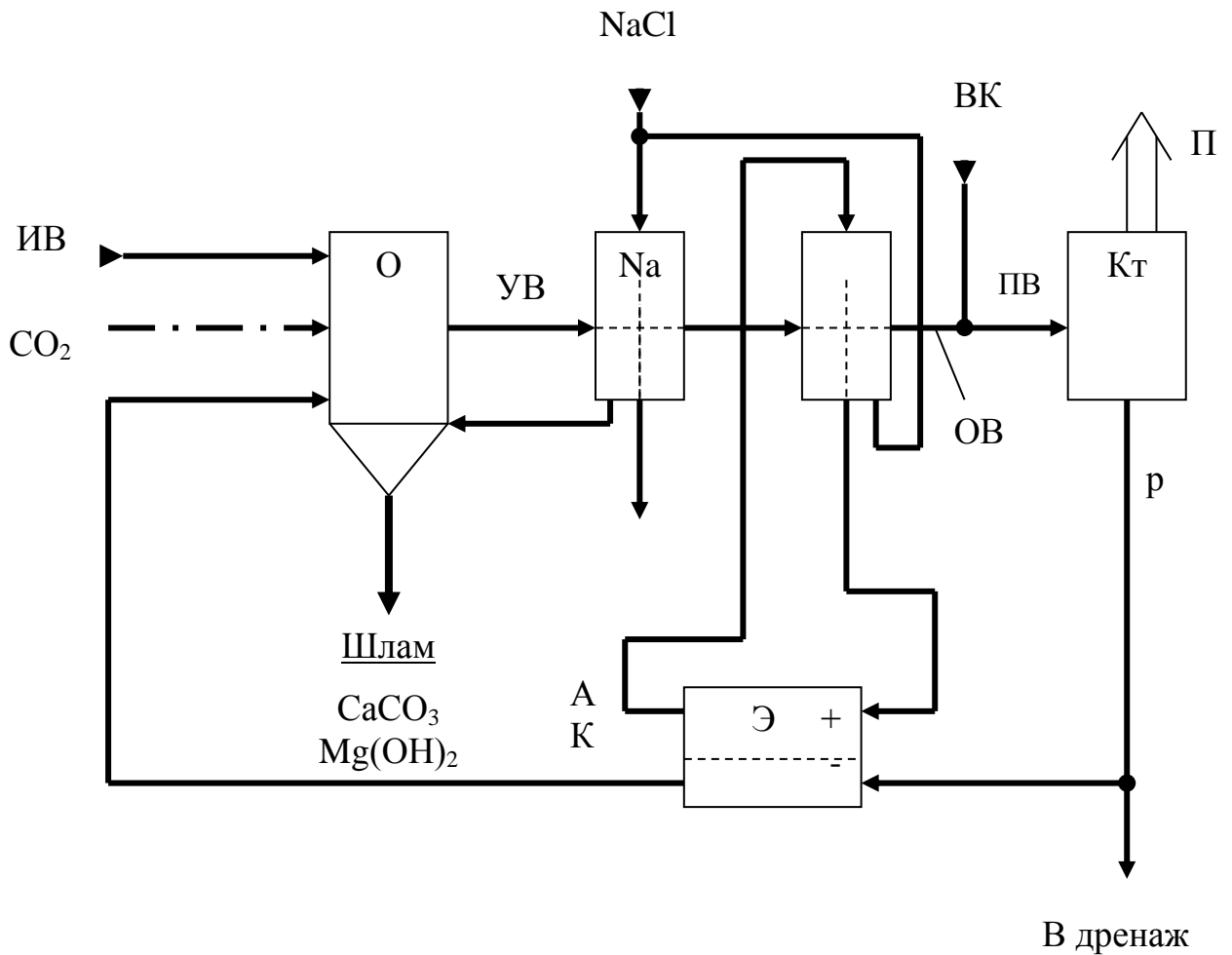


Рисунок 9.5 – Технологическая схема обработки пресной воды

Тогда для технологической схемы может быть записано балансовое равенство:

$$S_{нв} = \alpha_{ов} (S_{ув} - yЖ_k - zK) + p\varphi_1 (S_{кв} - x(\Pi_o + \Pi_э)) + \beta(S_{ув} - yЖ_k), \quad (9.2)$$

из которого определяется доля продувки (φ_1), направляемой на рециркуляцию:

$$\varphi_1 = \frac{S_{нв} - \alpha_{ов} (S_{ув} - yЖ_k - zK) - \beta(S_{ув} - yЖ_k)}{p(S_{кв} - x(\Pi_o - \Pi_э))}, \quad (9.3)$$

где $S_{кв}$ – допустимое солесодержание котловой воды;

$p = G_{np}/G_{нв}$ – доля продувки;

G_{np} – размер продувки;

x – снижение сухого остатка продувочной воды, мг/кг, эквивалентное 1 мг экв/кг ($Щ_o + Щ_э$), расходуемой на умягчение воды;

$Щ_o, Щ_э$ – общая щелочность котловой воды и щелочность, нарабатываемая в электролизере;

$\beta = G_{сн}/G_{нв}$ – удельный расход осветленной воды для отмывки фильтров;

$G_{сн}$ – расход осветленной воды для отмывки фильтров.

Дополнительное количество щелочи, нарабатываемое в электролизере, определяется по балансу по Na_2CO_3 :

$$\alpha_{ув}(C_{Ca} + \beta) = \alpha_{ув}(2Ж_k + C_{CO_2}) + pЩ_k\varphi + d_c\alpha_{ув},$$

откуда

$$d_c\alpha_{ув} = \alpha_{ув}(C_{Ca} + \beta) - \alpha_{ув}(2Ж_k + C_{CO_2}) - pЩ_k\varphi, \quad (9.4)$$

где $\alpha_{ув}(C_{Ca} + \beta)$ – общая потребность в соде для обработки исходной воды;

$pЩ_k\varphi$ – количество соды, вносимое в обрабатываемую воду с продувочной водой;

$\alpha_{ув}(2Ж_k + C_{CO_2})$ – количество соды, образующейся при реакциях умягчения воды едким натром.

9.3.2 Экологическое совершенствование технологии обработки сточных вод ХВО

Для обработки сточных вод ХВО используется продувочная вода испарителей с последующей электролизной обработкой и продувка диоксидом углерода стоков. Реализация указанной технологии дана на рисунке 9.6.

Исходная вода (ИВ) проходит обработку на ХВО, и умягченная вода (УВ) подается на термоопреснительную установку (ТОУ), на которой получают деминерализованную воду (ДВ). Продувка ТОУ, содержащая концентрат «мягких» солей, используется для регенерации натрий-катионитных фильтров (Na), часть ее обрабатывается в электролизере (Э). Анолит (А) из электролизера используется для «голодной» регенерации *H*-катионитного фильтра, а католит (К) – для осаждения «жестких» солей в виде CaCO_3 и Mg(OH)_2 , при этом используется подача диоксида углерода.

Стоки ХВО представляют собой концентрированные растворы минеральных солей, находящихся в диссоциированном состоянии. Химический анализ стоков ХВО, работающей по технологии натрий-катионирования, показывает, что основными компонентами в растворе являются ионы Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- . При этом общее солесодержание стоков составляет 15-20 г/кг, а основным компонентом в них являются соли натрия.

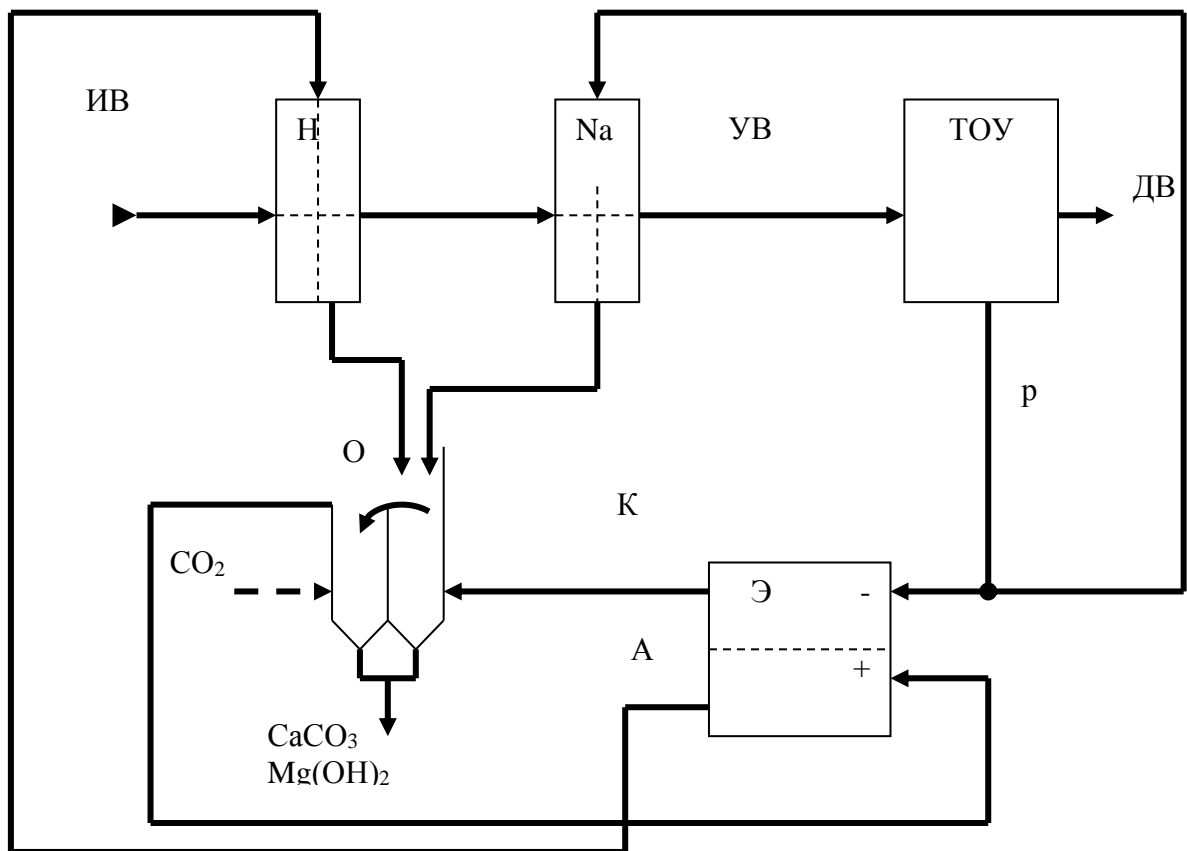


Рисунок 9.6 – Технологическая схема обработки сточных вод ХВО

Подобные растворы, помещенные в электростатическое поле, могут быть активными носителями электрического тока, а на пластинах (анод, катод), разделенных электрически нейтральной мембраной, возможно образование растворов кислоты и щелочи. Последние могут быть использованы в качестве реагентов в схемах утилизации сточных вод ХВО.

Получены аналитические зависимости в виде регрессионных уравнений, позволяющие для любого технологического режима определить количество нарабатываемой кислоты, щелочи и расход электроэнергии в зависимости от щелочности католита:

$$K = 10,982 - 31,961 \cdot I + 1,767 \cdot g + 22,37 \cdot d_k - 0,375 \cdot I \cdot g + 11,667 \cdot I \cdot d_k + 1,756 \cdot g \cdot d_k + 17,88 \cdot I^2 - 32,452 \cdot d_k^2; \quad (9.5)$$

$$\text{Щ} = -34,745 + 46,317 \cdot I + 3,078 \cdot g + 75,178 \cdot d_k + 4,307 \cdot I \cdot g + 2,917 \cdot I \cdot d_k + 2,458 \cdot g \cdot d_k - 21,179 \cdot I^2 - 86,959 \cdot d_k^2; \quad (9.6)$$

$$\text{Э} = -0,088 + 0,708 \cdot I + 0,016 \cdot g - 0,59 \cdot d_k - 0,073 \cdot I \cdot g - 0,328 \cdot d_k - 0,101 \cdot g \cdot d_k + 1,335 \cdot d_k^2, \quad (9.7)$$

где K – количество кислоты, мг экв / (ч·дм²);

Щ – количество щелочи, мг экв / (ч·дм²);

Э – расход электроэнергии в зависимости от щелочности католита, (кВт·ч) / (г экв·дм²);

g – расход обрабатываемой воды.

При проведении лабораторных исследований наблюдалась наиболее стабильная работа электролизера при одинаковых расходах через анодную и катодную камеру, то есть когда $d_k = 0,5$.

Плотность тока i , А/дм², при которой выход щелочи будет максимальным, определяется первой производной по току (I) регрессионного уравнения выработки щелочи:

$$\mathit{Щ}'(i) = 46,317 + 4,307 \cdot g + 2,917 \cdot d_r - 2 \cdot 21,179 \cdot i^2. \quad (9.8)$$

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература

1. Физикохимия воды и водных растворов: Учебное пособие. – А. Ф. Никифоров, Е. В. Мигалатий, В. И. Аксенов и др. – Екатеринбург: ГОУ Уральск ГТУ-УПИ, 2003. – 92 с.
2. Повышение экологической безопасности тепловых электростанций: Учебное пособие / А. И. Абрамов, Д. П. Елизаров, А. Н. Ремизов и др.; под ред. А. С. Седлова. – М.: Изд-во МЭИ, 2001. – 368 с.
3. Правила технической эксплуатации тепловых энергоустановок. – М.: Энергосервис, 2003. – 263 с.

Дополнительная литература

4. Обработка воды на тепловых электростанциях / А. И. Баулина, С. М. Гурвич, В. М. Квятковский и др.; под ред. В. А. Голубцова. – М.: Энергия, 1966. – 448 с.
5. Кострикин Ю. М.; Мещерский Н. А., Коровина О. В. Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1990.
6. Мещерский Н. А. Эксплуатация водоподготовительных установок электростанций высокого давления. – М.: Энергостройиздат, 1984. – 408 с.
7. Лившиц О. В. Справочник по водоподготовке котельных установок. – М.: Энергия, 1978. – 168 с.
8. Роддатис К. Ф., Полтарецкий А. Н. Справочник по котельным установкам малой производительности. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 488 с.
9. Патент 2 014 283 РФ. МКИ С 02 F 1/04. Способ подготовки питательной воды из высокоминерализованных вод / И. А. Гейвандов, А. Н. Вислогузов, А. И. Воронин, Н. И. Стоянов, Е. Е. Злыгостев.

Николай Иванович Стоянов

**ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ОБЪЕКТОВ
ТГВ**

Учебное пособие

Курс лекций для студентов специальности 290700 (270109) «Теплогазоснаб-
жение и вентиляция»

Редакторы:

Подписано в печать

Формат 60 × 84 1/16. Усл. п. л. – 7,56. Уч.- изд. л. – 6,05.

Бумага офсетная. Печать офсетная. Заказ № Тираж 50 экз.

ГОУВПО «Северо-Кавказский государственный технический
Университет»
355029, г. Ставрополь, пр. Кулакова, 2

Издательство ГОУВПО «Северо-Кавказский государственный тех-
нический университет»

Отпечатано в типографии ГОУВПО «СевКавГТУ»