

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего профессионального образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева»

Кафедра химической технологии твердого топлива

**КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ПО КУРСУ
«ВОДОПОДГОТОВКА» И МЕТОДИЧЕСКИЕ
УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ**

Методические указания к практическим занятиям и
самостоятельной работе по курсу «Водоподготовка» для студентов
профиля «Промышленная теплоэнергетика» направления
140100.68 «Промышленная теплоэнергетика и теплотехника»

Составители Г. В. Ушаков

Утверждены на заседании кафедры
Протокол № 5 от 22.12.2000 г.
Рекомендованы к печати
учебно-методической комиссией
специальности
Протокол № 1 от 16.01.2001 г.
Электронная копия находится
в библиотеке КузГТУ

КЕМЕРОВО 2013

1. ЦЕЛЬ И СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Работа предназначена для ознакомления студентов со способами выражения концентрации примесей в природных водах, с показателями жесткости и щелочности воды с процессами отложения накипи в водных средах.

Растворенные в воде вещества, определяющие жесткость и щелочность воды, вызывают те или иные неполадки в работе энергетического оборудования. В основном это связано с образованием в тепловых отложениях накипных отложений. Образующиеся накипные отложения значительно снижают теплопроизводительность котлов и водоподогревателей, а также увеличивают потери напора в трубах.

Студенты знакомятся с теоретическими положениями и решают задачи, связанные с водоподготовкой.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

2.1. Способы выражения концентрации растворов

Содержание вещества в определенном объеме или весовом количестве раствора называется его концентрацией или, точнее, концентрацией данного вещества в растворе. Способы выражения концентрации растворов могут быть различными, в водоподготовке наиболее часто применяют следующие.

Проценты по массе $C_{в.н}$, которые показывают массу вещества в 100 единицах массы раствора:

$$C_{в.н} = \frac{q_v}{10^3 V \rho} 100, \% \quad (1)$$

где V – объем раствора, л;

q_v – масса вещества, растворенного в объеме V , г;

ρ – плотность раствора, г/л.

Объемная концентрация $C_{о.к}$ показывает содержание вещества в единице объема раствора. Объемная концентрация может быть определена по формулам[^]

$$C_{o.k} = \frac{q_v}{V}, \text{ г/л} \quad (2)$$

или

$$C'_{o.k} = \frac{q_v 10^3}{V} \text{ мг/л.} \quad (3)$$

Следует отметить, что объемная концентрация раствора, выраженная в мг/л и г/м^3 , имеет одну и ту же численную величину в силу тождества $\text{мг/л} = \text{мг}/(1000/\text{л}) \cdot 1000 = \text{г/м}^3$.

Молярная концентрация C_m показывает количество грамм-молей данного вещества, растворенного в литре раствора. Для вычисления C_m необходимо количество граммов находящегося в литре вещества разделить на молекулярную массу M этого вещества:

$$C_m = \frac{C_{o.k}}{M} = \frac{q_v}{VM}, \text{ г-моль/л.} \quad (4)$$

Такой способ выражения концентрации растворов находит в водоподготовке ограниченное применение. Чаще концентрацию выражают количеством миллиграмм-эквивалентов вещества, находящимся в литре раствора. Эквивалентом данного вещества \mathcal{E}_k называют количество его массы, соответствующее в данной реакции единице валентности, т. е. одному атому водорода или другого одновалентного элемента.

Для определения величины \mathcal{E}_k необходимо молекулярную массу вещества разделить на его валентность в данной реакции:

$$\mathcal{E}_k = \frac{M}{n} \quad (5)$$

Величина эквивалента, как правило, не является постоянным числом, так как зависит от типа реакции.

Таким образом, чтобы выразить концентрацию раствора, например, в миллиграмм-эквивалентах $C_э$, необходимо количество растворенного в литре раствора вещества, выраженное в миллиграммах, разделить на его эквивалентную массу:

$$C_э = \frac{C'_{o.k}}{\mathcal{E}_k} = \frac{q_v 10^3}{V \mathcal{E}_k}, \text{ мг-экв/л.} \quad (6)$$

Кроме миллиграмм-эквивалента, в водоподготовке применяется единица в 1000 раз меньше, называемая микрограмм-эквивалентом (мкг-экв/л). Следовательно, $1 \text{ мкг-экв/л} = 0,001 \text{ мг-экв/л} = 0,000001 \text{ г-экв/л}$.

При пересчете одних концентраций в другие могут быть использованы формулы, приведенные в табл. 1. Надобность в таком пересчете возникает, в частности, при проверке правильности химического анализа воды.

Таблица 1

Формулы для пересчета концентраций

Данная концен- трация	Искомая концентрация				
	$C_{в.п}$	$C_{о.к}$	$C'_{о.к}$	C_m	$C_э$
$C_{в.п}$	-	$10C_{в.п}\rho$	$10^4 C_{в.п}\rho$	$\frac{10C_{в.п}\rho}{M}$	$\frac{10^4 C_{в.п}\rho}{Э_k}$
$C_{о.к}$	$\frac{C_{о.к}}{10\rho}$	-	$10^3 C_{о.к}$	$\frac{C_{о.к}}{M}$	$\frac{10^3 C_{о.к}}{Э_k}$
$C'_{о.к}$	$\frac{10^{-4} C'_{о.к}}{\rho}$	$10^{-3} C'_{о.к}$	-	$\frac{10^3 C'_{о.к}}{M}$	$\frac{C'_{о.к}}{Э_k}$
C_m	$\frac{C_m M}{10\rho}$	$C_m M$	$10^3 C_m M$	-	$\frac{10^3 C_m M}{Э_k}$
$C_э$	$\frac{10^{-4} C_э Э_k}{\rho}$	$10^{-3} C_э Э_k$	$C_э Э_k$	$\frac{10^{-3} C_э Э_k}{M}$	-

При так называемом полном анализе воды содержание в ней кальция, магния, натрия, аммония, железа, алюминия, хлоридов, сульфатов, нитратов, карбонатов, бикарбонатов и силикатов обычно выражают количеством миллиграммов в литре, а жесткость $Ж_0$ и щелочность $Щ_0$ – миллиграмм-эквивалентов в литре. При правильно выполненном анализе сумма всех положительных зарядов, обусловленных различными катионами, должна быть равна сумме всех отрицательных зарядов, обусловленных анионами. Следовательно, должно соблюдаться равенство:

$$\frac{(Na^+)}{22,997} + \frac{(Ca^{2+})}{20,04} + \frac{(Mg^{2+})}{12,16} + \frac{(NH_4^+)}{18,04} = \frac{(Cl^-)}{35,456} + \frac{(SO_4^{2-})}{48,03} + \frac{(NO_3^-)}{62,008} + Щ_0 \cdot (7)$$

Символы в скобках означают концентрацию соответствующего иона, выраженную в мг/л. В это равенство не включены слагае-

мые, соответствующие содержанию железа, алюминия, кремнекислоты, ионов CO_3^{2-} и HCO_3^- , по следующим причинам: железо и алюминий могут быть в виде ионов лишь в сильноокислой среде или (железо II) при полном отсутствии растворенного кислорода. Кремнекислота, т. е. SiO_3^{2-} и HSiO_3^- , а также ионы CO_3^{2-} и HCO_3^- входят в состав щелочности Щ_0 .

Кроме того, при правильно выполненном анализе должно соблюдаться равенство

$$\mathcal{J}_0 = \frac{(\text{Ca}^{2+})}{20,04} + \frac{(\text{Mg}^{2+})}{12,16}. \quad (8)$$

2.2. Жесткость

Жесткостью называется суммарное количество содержащихся в воде катионов кальция Ca^{2+} и магния Mg^{2+} , выраженное в миллиграмм-эквивалентах в литре (*мг-экв/л*) или микрограмм-эквивалентах в литре (*мкг-экв/л*).

Для измерения малых величин жесткости, которыми обладают конденсат, дистиллят, питательная вода паровых котлов и катионированная вода, применяется микрограмм-эквивалент в литре.

По отношению между величиной жесткости воды \mathcal{J}_0 и концентрацией в ней ионов $[\text{HCO}_3^-]$ природные воды можно разделить на две группы: для одной $\mathcal{J}_0 > [\text{HCO}_3^-]$, для другой $\mathcal{J}_0 < [\text{HCO}_3^-]$. В водах первой группы различают жесткость общую \mathcal{J}_0 , карбонатную $\mathcal{J}_K = [\text{HCO}_3^-]$ мг-экв/л, некарбонатную \mathcal{J}_{HK} , кальциевую \mathcal{J}_{Ca} и магниевую \mathcal{J}_{Mg} . Между ними существует следующая зависимость:

$$\mathcal{J}_0 = \mathcal{J}_K + \mathcal{J}_{HK} = \mathcal{J}_{Ca} + \mathcal{J}_{Mg}. \quad (9)$$

Для вод второй группы, которые называются щелочными, понятие карбонатной и некарбонатной жесткости теряет смысл, поскольку $[\text{HCO}_3^-] > \mathcal{J}_0$. Для этих вод следует различать жесткость общую, кальциевую и магниевую, а также щелочность (см. ниже). При расчетах процессов в водообработке для щелочных вод следует условно принимать $\mathcal{J}_K = \mathcal{J}_0$, $\mathcal{J}_{HK} = 0$, учитывая избыточную концентрацию ионов $[\text{HCO}_3^-]$.

Мягкие воды (умягченная, питательная, конденсат и т. п.) обладают лишь общей или остаточной жесткостью \mathcal{J}_0 . Следует обра-

титель внимание на то, что присутствие в воде соединений натрия не придает ей жесткости.

На практике часто приходится определять жесткость смеси двух или нескольких потоков воды. Например, в конденсаторы паровых турбин через неплотности проникает жесткая охлаждающая вода, вследствие чего жесткость конденсата увеличивается. В этом случае бывает необходимо установить размер присоса, т. е. количество проникающей в конденсатор воды. Решение подобного рода задач основывается на следующих очевидных равенствах:

$$Ж_{см} = Ж'_o a + Ж''_o b \text{ и } a + b = 1, \quad (10)$$

где $Ж_{см}$ – жесткость смеси;

$Ж'_o$ и $Ж''_o$ – соответственно жесткости первого и второго

потоков;

a, b – соответственно величины первого и второго потоков, выраженные в долях единицы.

2.3. Щелочность

Щелочностью воды называют общее содержание веществ, обуславливающих при диссоциации или в результате гидролиза повышенную концентрацию ионов OH^- .

Обычно в природных водах щелочность вызывается присутствием в них ионов HCO_3^- , SiO_3^{2-} и реже CO_3^{2-} , а также присутствием гуматов. В щелочных и котловых водах, кроме перечисленных веществ, щелочность обуславливается также присутствием ионов PO_4^{3-} , HPO_4^{2-} и непосредственно ионами OH^- . Процесс определения щелочности заключается в постепенном добавлении к отмеренной порции воды 0,1-н. или 0,01-н. раствора кислоты (обычно серной или соляной). Перед этим к воде прибавляют тот или иной индикатор. Изменение окраски раствора свидетельствует о достижении такой величины рН, которая отвечает интервалу перехода цвета данного индикатора. В этот момент прекращают добавлять кислоту и отмечают, какое количество ее было израсходовано на нейтрализацию щелочности. Чаще всего в качестве индикаторов для определения щелочности воды пользуются метилоранжем и фенолфталеином; поэтому различают щелочность по метилоранжу $Щ_{м,о}$, называемую также общей щелочностью, и щелоч-

ность по фенолфталеину. Между этими величинами имеются различные соотношения в зависимости от характера щелочности.

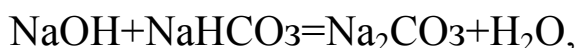
Так, если анализируется раствор едкого натра, то $Щ_{\phi} = Щ_{\text{м}}$; если раствор соды, то $Щ_{\phi} = 0,5 Щ_{\text{м}}$; если раствор, содержащий только бикарбонаты, то $Щ_{\phi} = 0$ и т. д. Руководствуясь соотношением между $Щ_{\phi}$ и $Щ_{\text{м}}$, можно определить, какими именно соединениями обусловлена щелочность данного водного раствора. Однако часто для решения этой задачи требуются и дополнительные сведения, в частности необходимо знать концентрацию ионов SiO_3^{2-} или HSiO_3^- , знание содержания гуматов, фосфатов и т. д.

Если в воде могут присутствовать из щелочных соединений только гидраты, т.е. NaOH , $\text{Ca}(\text{OH})_2$ или $\text{Mg}(\text{OH})_2$, затем карбонаты Na_2CO_3 , CaCO_3 , MgCO_3 и, наконец, бикарбонаты, т. е. NaHCO_3 , $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ и $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$, то, обозначая эти щелочности соответственно через гидратную щелочность $Щ_{\text{г}}$, карбонатную – $Щ_{\text{к}}$ и бикарбонатную – $Щ_{\text{б}}$, можно написать следующие уравнения:

$$Щ_{\phi} = Щ_{\text{г}} + 0,5Щ_{\text{к}}; \quad (11)$$

$$Щ_{\text{о}} = Щ_{\text{м}} = Щ_{\text{г}} + Щ_{\text{к}} + Щ_{\text{б}}. \quad (12)$$

Так как в воде бикарбонаты и гидраты взаимно нейтрализуются:



то эта система уравнений распадается на две самостоятельные. Первая система

$$Щ_{\phi} = Щ_{\text{г}} + 0,5Щ_{\text{к}}; \quad (13)$$

$$Щ_{\text{о}} = Щ_{\text{м}} = Щ_{\text{г}} + Щ_{\text{к}} \quad (14)$$

относится к тому случаю, когда в воде отсутствуют бикарбонаты и когда $Щ_{\phi} > 0,5Щ_{\text{м}}$.

Вторая система:

$$Щ_{\phi} = 0,5Щ_{\text{к}}; \quad (15)$$

$$Щ_{\text{о}} = Щ_{\text{м}} = Щ_{\text{к}} + Щ_{\text{б}} \quad (16)$$

соответствует тому случаю, когда присутствуют бикарбонаты и отсутствуют гидраты; при этом $Щ_{\phi} < 0,5Щ_{\text{м}}$. Все возможные варианты $Щ_{\text{г}}$, $Щ_{\text{к}}$ и $Щ_{\text{б}}$ представлены в табл. 2, в которой даны также и формулы для вычисления этих величин, исходя из значений $Щ_{\phi}$ и $Щ_{\text{м}}$.

Конечно, соотношениями, приведенными в табл. 1, можно пользоваться лишь тогда, когда щелочность заведомо обусловлена лишь гидратами или бикарбонатами и карбонатами. Соотношения существенно усложняются, если присутствуют также фосфаты, гуматы и силикаты.

Таблица 2

Варианты систем, состоящих только из гидратной, карбонатной и бикарбонатной щелочностей

Соотношение между $Щ_{\phi}$ и $Щ_{\text{м}}$	$Щ_{\text{г}}$	$Щ_{\text{к}}$	$Щ_{\text{б}}$
$Щ_{\phi} > 0,5Щ_{\text{м}}$	$2Щ_{\phi} - Щ_{\text{м}}$	$2(Щ_{\text{м}} - Щ_{\phi})$	Нет
$Щ_{\phi} = 0,5Щ_{\text{м}}$	Нет	$Щ_{\text{м}} = 2Щ_{\phi}$	Нет
$Щ_{\phi} < 0,5Щ_{\text{м}}$	Нет	$2Щ_{\phi}$	$Щ_{\text{м}} - 2Щ_{\phi}$
$Щ_{\phi} = Щ_{\text{м}}$	$Щ_{\phi} = Щ_{\text{м}}$	Нет	Нет
$Щ_{\phi} = 0; Щ_{\text{м}} > 0$	Нет	Нет	$Щ_{\text{м}}$

2.4. Накипеобразование

Независимо от характера потребления воду на электростанциях и в промышленных котельных подвергают нагреванию или охлаждению; в ряде случаев в нее вводят те или иные реагенты. Как следствие воздействия на воду тепла и реагентов, а также из-за упаривания ее в паровых котлах в ней протекают различные физико-химические процессы, в результате чего одни соединения разрушаются, а другие образуются. Это ведет во многих случаях к возникновению различных труднорастворимых веществ, которые и выделяются из пересыщенных растворов в виде осадка, т. е. твердого вещества или, как часто говорят, в виде твердой фазы. Такими веществами являются соединения кальция и магния, а также продукты коррозии железа и медных сплавов.

Как известно, образование и выпадение осадка происходит только из пересыщенных растворов того или иного соединения. Следовательно, выпадение твердой фазы из раствора становится возможным лишь при определенных условиях. Одно из этих условий заключается в соблюдении правила произведения растворимости.

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

$$[K^+][A^-] = PP = const, \quad (17)$$

которое достаточно точно для сравнительно разбавленных растворов; $[K^+]$ и $[A^-]$ означают концентрации соответственно катиона и аниона, выраженные в $г\text{-ион/л}$.

Физический смысл этого равенства заключается в том, что в насыщенном растворе труднорастворимого вещества произведение концентраций находящихся в растворе ионов, из которых состоит это вещество, при данной температуре есть величина постоянная ($const$). Эта величина называется произведением растворимости (PP).

Следовательно, если $[K^+][A^-] < PP$ – раствор ненасыщен и осадок выпадать не будет; при $[K^+][A^-] > PP$ – выпадение осадка, вообще говоря, оказывается неизбежным. Численное значение величины PP различно для различных соединений; для каждого данного вещества величина PP зависит от температуры раствора.

Если труднорастворимое вещество имеет формулу K_nA_m , то уравнение для произведения растворимости примет следующий вид:

$$[K^+]^n[A^-]^m = PP. \quad (18)$$

Например, для $Ca(OH)_2$ следует написать $[Ca^{2+}][OH^-]^2 = PP$, а для $CaCO_3$ - $[Ca^{2+}][CO_3^{2-}] = PP$.

Следует обратить внимание на то, что по правилу произведения растворимости для образования осадка, например $CaCO_3$, совсем не обязательна высокая концентрация в растворе именно иона кальция. Осадок $CaCO_3$ может выпасть и при малом значении $[Ca^{2+}]$, т. е. при малой жесткости раствора, если концентрация карбонатного иона $[CO_3^{2-}]$ будет столь большой, чтобы произведение $[Ca^{2+}][CO_3^{2-}]$ превысило величину PP при данной температуре.

Если известна величина PP , то можно определить растворимость S вещества в $г\text{-моль/л}$, которая, например, для веществ типа KA будет равна

$$S = \sqrt{PP}, \text{ г-моль/л.} \quad (19)$$

Выпадение осадков (кристаллизация) может происходить непосредственно на поверхностях нагрева. Такое явление называется первичным процессом накипеобразования, в результате которого возникают обычно твердые накипные отложения. Вторичный процесс накипеобразования характеризуется тем, что осадки вначале выпадают в толще котловой воды, а в последующем возникшие взвешенные частицы образуют прочно сцепленные с поверхностью нагрева вторичные отложения.

Количество, вносимых в котел накипе- и шламообразователей, за период времени t может быть определено по формуле

$$B_p = \frac{Ж_о Э_к D_{нв} t}{10^3}, \text{ кг} \quad (20)$$

где $Ж_о$ – концентрация накипе- или шламообразующих веществ в питательной воде, в частности жесткость питательной воды, мг-экв/л;

$Э_к$ – численное значение эквивалента для рассматриваемого вещества или средневзвешенное его значение для данной группы веществ;

$D_{нв}$ – количество питательной воды, т/ч.

На практике величина t может равняться 7000-8000 ч, когда вскрытие котла и чистка внутренних поверхностей нагрева проводятся один раз в год. Естественно поэтому, что даже при малых значениях $Ж_о$ получаются большие величины B_p , особенно для котлов высокой производительности $D_{нв}$.

Паровой котел по отношению к накипе- и шламообразующим веществам является до некоторой степени суммирующим, собирающим аппаратом. Опыт эксплуатации показывает, однако, что далеко не все вещества, попадающие в котел, остаются в нем в виде шлама или накипи. Часть их, иногда весьма значительная, уходит из котла с продувочной водой. Поэтому целесообразно ввести понятие о коэффициенте накопления загрязнений в котле $K_з$, равном

$$K_з = \frac{B_\phi}{B_p}, \quad (21)$$

где B_ϕ – фактическое количество отложившихся в котле твердых веществ, кг.

При $K_з = 1$ все вносимые в котел вещества остаются в нем, т. е. происходит максимальное загрязнение котла, что, однако, на

практике не наблюдается. Условие $K_3 = 0$ отвечает безнакипному состоянию поверхностей котла. В действительности $0 < K_3 < 1$, и задача правильной эксплуатации заключается в том, чтобы держать K_3 возможно ближе к нулю. На величину коэффициента K_3 влияют многие факторы, из которых можно, например, упомянуть свойства шлама, состояние внутренней поверхности, величину теплового потока, интенсивность циркуляции и т. д. Опыт показывает, что численное значение K_3 для разных станций, а иногда и разных котлов одной и той же станции колеблется в широких границах.

Величину B_{ϕ} для водотрубных котлов (допускающих шарошение) на практике определяют путем очистки от отложений внутренних поверхностей труб с помощью шарошки (системы вращающихся фрез). Для этого в том или ином элементе поверхности нагрева котла (панель бокового или заднего экрана, первый кипящий пучок и т. п.) намечают несколько контрольных труб, которые и подвергают контрольному шарошению. Удаляемые из труб шарошкой отложения собирают и взвешивают. Зная количество отложений в данной контрольной трубе b_i и ее поверхность нагрева h_i , можно определить удельную загрязненность трубы σ (г/м²), считая, что отложения распределены в ней равномерно по всей поверхности:

$$\sigma_1 = \frac{b_1}{h_1}; \quad \sigma_2 = \frac{b_2}{h_2}; \quad \dots \quad \sigma_i = \frac{b_i}{h_i}, \text{ г/м}^2. \quad (22)$$

Используя эти данные, можно определить среднее значение удельной загрязненности для всех контрольных труб данного элемента поверхности нагрева:

$$\sigma = \frac{b_1 + b_2 + \dots + b_i}{h_1 + h_2 + \dots + h_i} = \frac{\Sigma b}{\Sigma h}, \text{ г/см}^2 \quad (23)$$

где i – количество контрольных труб в данном элементе поверхности нагрева котла, шт.;

Σb_i – общее количество отложений со всех контрольных труб;

Σh_i – суммарная поверхность нагрева контрольных труб, м².

Считается, что для экранированных котлов $\sigma = 20$ г/м². Если принять, что найденная таким путем величина σ характеризует удельное загрязнение поверхности всего элемента, что может оказаться справедливым при правильном выборе числа и расположе-

ния контрольных труб, то количество отложений на всей поверхности нагрева h_{ϑ} данного элемента B_{ϕ}^{ϑ} будет равно^

$$B_{\phi}^{\vartheta} = \sigma h = \frac{\sum b}{\sum h} h_{\vartheta}, \text{ г.} \quad (24)$$

Можно получить общее количество отложений по котлу в целом, суммируя эти количества, т. е.

$$B_{\phi} = \sum B_{\phi}^{\vartheta} 10^{-3}, \text{ кг.} \quad (25)$$

Поскольку отложения образуются из воды, важным и интересным показателем является также величина:

$$\sigma_{\text{щ}} = \frac{E_{\phi} 10^3}{D_{\text{н.в}} t}. \quad (26)$$

Она показывает, сколько граммов отложений, образовавшихся на поверхности нагрева котла за t часов его работы, приходится на 1 m питательной воды, поданной в котел за тот же промежуток времени. Можно считать приемлемым, если при $t = 8000 \text{ ч}$ значение $\sigma_{\text{щ}}$ не превышает 0,04 $г/г$, что примерно соответствует удельной загрязненности поверхности нагрева котла $\sigma = 20 \text{ г/м}^2$. Следует обратить внимание на весьма малое приведенное численное значение величины $\sigma_{\text{щ}}$. Оно соответствует величине жесткости питательной воды, примерно равной 0,8 $мгг\text{-экв/л}$.

В том случае, когда возникшие в котле отложения состоят в основном из соединений кальция и магния, т. е. обусловлены жесткостью питательной воды, значение $\sigma_{\text{щ}}$ можно определить из следующего приближенного равенства:

$$\sigma_{\text{щ}} = H_o \mathcal{E}_c K_3, \text{ г/т} \quad (27)$$

откуда

$$H_o \mathcal{E}_c K_3 = \frac{B_{\phi} 10^3}{D_{\text{н.в}} t} \quad \text{или} \quad K_3 = \frac{B_{\phi} 10^3}{H_o \mathcal{E}_c D_{\text{н.в}} t}, \quad (28)$$

где \mathcal{E}_c – некоторый условный эквивалент для суммы веществ, образующих отложения;

H_o – жесткость воды, $мгг\text{-экв/л}$.

Среднюю толщину отложений можно определить по формуле

$$\delta = \frac{B}{h\rho 10^3}, \text{ мм} \quad (29)$$

где B – количество отложений, собранных с поверхности нагрева h , г;

ρ – плотность отложений, кг/м^3 .

При прочих равных условиях можно предполагать, что отложение накипи или шлама будет пропорционально паронапряжению d_n ($\text{кг/м}^2 \cdot \text{ч}$) поверхности нагрева, т. е.

$$\sigma = \sigma_{\text{щ}} d_n t 10^{-3} \text{ г/м}^2 \quad (30)$$

или

$$\sigma = d_n t H_0 \mathcal{E}_c K_3 10^{-3}. \quad (31)$$

Вместо J_0 может быть подставлена некоторая средняя концентрация всех накипе- и шламообразующих соединений, условно выраженная в мг-экв/л .

Если в котле протекают процессы, связанные с выпадением в осадок или разложением некоторого вещества, то количество его, выпавшее в осадок или разложившееся, R может быть определено из равенства

$$R = S_{n.в} - p_n (S_{к.в} - S_{n.в}), \text{ мг/л (мг-экв/л)} \quad (32)$$

где $S_{n.в}, S_{к.в}$ – концентрация вещества соответственно в питательной и котловой воде, мг/л (мг-экв/л),

p_n —величина продувки котла в долях паропроизводительности.

Если $R = 0$, то получаем равенство:

$$\frac{S_{n.в}}{S_{к.в}} = \frac{p_n}{1 + p_n}. \quad (33)$$

Если же:

$$\frac{S_{n.в}}{S_{к.в}} > \frac{p_n}{1 + p_n}, \quad (34)$$

то $R \neq 0$, и, следовательно, образуется осадок или происходит распад вещества. Максимальное значение R достигается при:

$$p_n (S_{к.в} - S_{n.в}) = 0 \quad \text{или} \quad S_{к.в} = S_{n.в}.$$

При данном значении разности ($S_{к.в} - S_{п.в}$) величина R тем больше, чем меньше продувка котла p_n . Вот почему при повышенной концентрации железа в питательной воде для предотвращения железистых отложений нежелательно снижать продувку котла меньше 1%.

Если вещество подвергается в котле распаду, то величина распада ΔS может быть определена по формуле

$$\Delta S = \frac{S_{к.в}^p - S_{к.в}^f}{S_{к.в}^p}, \quad (35)$$

где $S_{к.в}^p$, $S_{к.в}^f$ — расчетная и фактическая концентрации рассматриваемого вещества в котловой воде, мг/л (мг-экв/л).

3. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

Способы выражения концентрации

Задача 3.1. В $0,5 \text{ м}^3$ раствора содержится 25 кг кальцинированной соды Na_2CO_3 . Выразить концентрацию раствора в рассмотренных выше единицах измерения, если плотность раствора равна $1,05$.

Решение

Проценты по массе.

Сначала получаем количество соды, находящейся в 100 л раствора. Оно, очевидно, составит 5 кг . 100 л раствора с плотностью $1,05$ будут составлять 105 кг . Тогда

$$C_{в.н} = \frac{5 \cdot 100}{105} = 4,76 \text{ \%}.$$

Тот же результат будет получен, если объем раствора будет предварительно переведен в литры, а величина q_v в граммы:

$$C_{в.н} = \frac{q_v 10^2}{10^3 V \rho} = \frac{25 \cdot 10^3 \cdot 10^2}{0,5 \cdot 10^3 \cdot 1,05 \cdot 10^3} = 4,76 \text{ \%}.$$

При упрощенном расчете, полагая $\rho = 1$, получим $C_{в.н} = 5\%$, т. е. ошибка составит приблизительно 5%.

Объемная концентрация.

По определению

$$C_{o.k} = \frac{q_v}{V} = \frac{25}{0,5} = 50 \text{ кг/м}^3 \text{ (г/л)}.$$

Молярная концентрация.

Подставляем численные значения величин в формулу

$$C_M = \frac{q_v}{VM} = \frac{25}{0,5 \cdot 106} = 0,47 \text{ г-моль/л}.$$

Нормальная (эквивалентная) концентрация при использовании соды для умягчения воды, т. е. при эквивалентной массе соды, равной половине молекулярного веса.

В формулу

$$C_{\text{э}} = \frac{C'_{o.k}}{\text{Э}_k} = \frac{q_v 10^3}{V \text{Э}_k}$$

следует подставить численное значение q_v , выраженное в мг/л , и V – в л . Эквивалентную массу соды в данном случае следует принять равной 53:

$$C_{\text{э}} = \frac{25 \cdot 10^3 \cdot 10^3}{0,5 \cdot 53 \cdot 10^3} = 945 \text{ мг-экв/л}.$$

Задача 3.2. Анализ сырой воды следующий (в мг/л): $\text{Na}^+ = 73,6$; $\text{Ca}^{2+} = 74,7$; $\text{Mg}^{2+} = 19,5$; $\text{NH}_4^+ = 3,8$; $\text{SO}_4^{2-} = 231,8$; $\text{Cl}^- = 59,0$; $\text{NO}_2^- = 0,03$; $\text{NO}_3^- = 0,98$; жесткость $\text{Ж}_o = 5,33 \text{ мг-экв/л}$, щелочность $\text{Щ}_o = 2,24 \text{ мг-экв/л}$. Проверить точность выполнения анализа.

Решение. Вначале необходимо выразить концентрацию всех ионов в эквивалентной форме делением данной объемной концентрации на эквивалентную массу соответствующего иона:

$$\text{Na}^+ = \frac{73,6}{22,997} = 3,12 \text{ мг-экв/л};$$

$$\text{Ca}^{2+} = \frac{74,7}{20,04} = 3,74 \text{ мг-экв/л}.$$

После деления получим: $\text{Mg}^{2+} = 1,61$; $\text{NH}_4^+ = 0,22$; $\text{SO}_4^{2-} = 4,81$; $\text{Cl}^- = 1,67$; $\text{HCO}_3^- = 2,24$; $\text{NO}_2^- = 0,001$; $\text{NO}_3^- = 0,016$. Суммируя ка-

тионы и анионы, найдем:

$$\sum K = 8,69 \text{ мг-экв/л};$$

$$\sum A = 8,52 \text{ мг-экв/л}.$$

Величина относительной ошибки составляет

$$\frac{\sum K - \sum A}{K} 100 = \frac{0,17 \cdot 100}{8,69}.$$

Жесткость равна

$$J_o = \frac{Ca^{2+}}{20,04} + \frac{Mg^{2+}}{12,16} = 5,35 \text{ мг-экв/л}.$$

Анализ следует признать достаточно точным.

Жесткость

Задача 3.3. Жесткость сырой воды составляет 4 мг-экв/л, а содержание кальция равно 60 мг/л. Определить магниевую жесткость и содержание магния в воде.

Решение. Общая жесткость равна сумме кальциевой и магниевой жесткостей, т. е.

$$J_o = J_{Ca} + J_{Mg} = \frac{(Ca^{2+})}{20} + \frac{(Mg^{2+})}{12}.$$

В числителе в скобках обозначена концентрация в воде кальция и магния в мг/л, в знаменателе—округленные величины эквивалентных масс. Из этого равенства находим

$$J_{Mg} = J_o - J_{Ca} = 4 - 3 = 1 \text{ мг-экв/л}.$$

Следовательно: Mg = 12 мг/л.

Задача 3.4. Качество сырой воды характеризуется следующими данными: $J_o = 5$ мг-экв/л, $J_{нк} = 2000$ мкг-экв/л. Определить J_{Ca} , J_k и J_{Mg} в мг-экв/л, если $J_o : J_{Mg} = 4$.

Решение. Карбонатную жесткость легко определить из равенства $J_k = J_o - J_{нк} = 5 - 2 = 3$ мг-экв/л.

Магниевая жесткость составляет

$$J_{Mg} = J_o : 4 = 5 : 4 = 1,25 \text{ мг-экв/л}.$$

Тогда кальциевая жесткость будет равна

$$J_{Ca} = J_o - J_{Mg} = 5 - 1,25 = 3,75 \text{ мг-экв/л}.$$

Щелочность

Задача 3.5. Карбонатная щелочность известкованной воды составляет 0,4 мг-экв/л. Определить избыток в воде $\text{Ca}(\text{OH})_2$, если общая щелочность воды равна 0,7 мг-экв/л.

Решение. Общая щелочность при отсутствии гуматов равна сумме гидратной и карбонатной щелочностей, т. е. $\text{Щ}_o = \text{Щ}_z + \text{Щ}_k$. Поскольку $\text{Ca}(\text{OH})_2$ обуславливает гидратную щелочность, находим

$$\text{Ca}(\text{OH})_2 = \text{Щ}_z = \text{Щ}_o - \text{Щ}_k = 0,7 - 0,4 = 0,3 \text{ мг-экв/л.}$$

Задача 3.6. В 5 л дистиллированной воды растворили 0,4 г NaOH и 265 мг Na_2CO_3 . Определить величину и характер щелочности раствора.

Решение. Поскольку в растворе содержатся ионы OH^- и CO_3^{2-} , то общая щелочность раствора состоит из гидратной и карбонатной щелочностей, т. е. $\text{Щ}_o = \text{Щ}_z + \text{Щ}_k$. Для определения величины щелочности находим вначале объемную концентрацию, которая будет равна

$$(\text{NaOH}) = 400 : 5 = 80 \text{ мг/л и } (\text{Na}_2\text{CO}_3) = 265 : 5 = 53 \text{ мг/л.}$$

Разделив найденные величины объемных концентраций на эквиваленты соответствующих соединений, получим щелочность:

$$\text{Щ}_z = 80 : 40 = 2; \text{Щ}_k = 53 : 53 = 1 \text{ мг-экв/л.}$$

Накипеобразование

Задача 3.7. Жесткость питательной воды составляет 10 мг-экв/л. Какую концентрацию Na_2CO_3 (г/л) необходимо создать в этой воде, чтобы при приведенной величине жесткости выпал осадок CaCO_3 , если считать, что жесткость является кальциевой и температура воды равна 25° С?

Решение. Величина произведения растворимости PP для карбоната кальция при 25° С равна $4,8 \cdot 10^{-9}$. Следовательно, для образования осадка необходимо, чтобы $[\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}] > 4,8 \cdot 10^{-9}$ или

$$[\text{CO}_3^{2-}] > \frac{4,8 \cdot 10^{-9}}{[\text{Ca}^{2+}]} \text{ г-ион/л.}$$

Это неравенство и определяет величину концентрации кальцинированной соды, при которой возможно образование осадка карбоната

кальция при 25 °С. Для вычисления $[CO_3^{2-}]$ необходимо концентрацию иона кальция, которая приведена в *мкг-экв/л*, выразить в *г-ион/л* и найденное значение подставить уже в это неравенство. Концентрацию пересчитывают по формуле

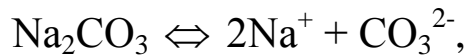
$$[Ca^{2+}] = \frac{Ж_о \cdot \mathcal{E}_к}{10^6 A_г} = \frac{10 \cdot 20}{10^6 40} = 0,5 \cdot 10^{-5} \text{ г-ион/л,}$$

где $A_г$ – атомная масса элемента (в данном случае кальция).

Жесткость $Ж_о$ в этой формуле выражена в *мкг-экв/л*. Тогда

$$[CO_3^{2-}] > \frac{4,8 \cdot 10^{-9}}{0,5 \cdot 10^5} = 9,6 \cdot 10^{-4} \text{ г-ион/л.}$$

Поскольку Na_2CO_3 в растворе диссоциирует на ионы по уравнению



т. е. одной молекуле соды соответствует в растворе один ион CO_3^{2-} , то количество грамм-молекул углекислого натрия, находящихся в растворе, будет численно равно концентрации иона CO_3^{2-} , выраженной в *г-ион/л*. Следовательно, концентрация Na_2CO_3 должна составлять

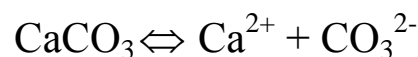
$$[Na_2CO_3] > 9,6 \cdot 10^{-4} \cdot 106 = 0,102 \text{ г/л,}$$

т. е. несколько больше 2 *мг-экв/л*.

Задача 3.8. Определить жесткость насыщенного раствора углекислого кальция, для которого действительно равенство

$$[Ca^{2+}][CO_3^{2-}] = 4,8 \cdot 10^{-9}.$$

Решение. Из уравнения диссоциации карбоната кальция $CaCO_3$



следует, что количество образующихся ионов кальция равно числу ионов CO_3^{2-} , т. е. $[Ca^{2+}] = [CO_3^{2-}]$, и, следовательно, можно написать $[Ca^{2+}]^2 = 4,8 \cdot 10^{-9}$, откуда

$$[Ca^{2+}] = \sqrt{4,8 \cdot 10^{-9}} = 6,9 \cdot 10^{-5} \text{ г-ион/л.}$$

Выразив величину этой концентрации в *мг/л* и разделив ее на эквивалент кальция, найдем жесткость раствора:

$$Ж_о = \frac{[Ca^{2+}]A_г 10^3}{Э_к} = \frac{6,9 \cdot 10^{-5} \cdot 40 \cdot 10^3}{20} = 0,138 \text{ мг-экв/л.}$$

Задача 3.9. Жесткость насыщенного раствора $MgCO_3$ при 25 °С равна 6,38 мг-экв/л. Найти произведение растворимости PP для карбоната магния.

Решение. Для определения величины PP необходимо предварительно найти концентрацию ионов Mg^{2+} и CO_3^{2-} в г-ион/л. Углекислый магний диссоциирует в растворе по уравнению



из которого следует, что количество ионов Mg^{2+} или CO_3^{2-} равно количеству молекул, находящихся в растворе. Молярная концентрация карбоната магния будет равна

$$MgCO_3 = \frac{Ж_о Э_к}{10^3 M} = \frac{6,38 \cdot 42,16}{10^3 \cdot 84,33} = 3,19 \cdot 10^{-3} \text{ г-моль/л.}$$

Следовательно:

$$PP = [Mg^{2+}][CO_3^{2-}] = (3,19 \cdot 10^{-3})^2 = 1 \cdot 10^{-5}.$$

Задача 3.10. Жесткость питательной воды промышленной котельной составляет 0,4 мг-экв/л. Определить количество (кг) вносимых в котел накипе- и шламообразователей (в пересчете на $CaCO_3$) за 2500 ч его работы, если производительность котла по питательной воде составляет 5 т/ч.

Решение. В питательной воде могут содержаться различные шламо- и накипеобразующие вещества, величина эквивалента которых различна. Поскольку состав и характер этих веществ во многих случаях неизвестны, то в целях упрощения расчетов, когда необходимы лишь примерные данные, принимают, что вносимые в котел указанные вещества выпадают в виде какого-либо наиболее вероятного соединения определенного состава, например $CaCO_3$.

В 1 т питательной воды содержится $CaCO_3$:

$$CaCO_3 = Ж_о Э_к 10^{-3} = 0,4 \cdot 50 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 10^{-2} \text{ кг.}$$

Всего в котел будет подано $2500 \cdot 5 = 12500$ т воды.

Следовательно, количество шламо- и накипеобразователей составит $12500 \cdot 2 \cdot 10^{-2} = 250$ кг.

Задача 3.11. При содержании в воде ионов Ca^{2+} , SO_4^{2-} и CO_3^{2-} возможно выпадение в осадок двух веществ: CaSO_4 и CaCO_3 . Поскольку в щелочной котловой воде карбонат кальция выпадает в виде шлама, а сульфат кальция образует твердые накипные отложения, то на практике стремятся создать в котловой воде такие условия, чтобы в осадок выпадал карбонат, а не сульфат кальция. Этого достигают тем, что в котловой воде путем ввода кальцинированной соды поддерживают такую концентрацию иона CO_3^{2-} , при которой выпадение сульфата кальция становится невозможным. Определим эту концентрацию карбонат-иона, решив задачу в общем виде.

Решение. Для насыщенного раствора карбоната и сульфата кальция можно написать:

$$[\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}] = \text{PP}_k$$

и

$$[\text{Ca}^{2+}][\text{SO}_4^{2-}] = \text{PP}_c.$$

Выпадение сульфата кальция не произойдет, если будет соблюдено следующее неравенство:

$$[\text{Ca}^{2+}] < \frac{\text{PP}_c}{[\text{SO}_4^{2-}]}.$$

С другой стороны, для насыщенного раствора CaCO_3 концентрация кальция будет равна

$$[\text{Ca}^{2+}] = \frac{\text{PP}_k}{[\text{CO}_3^{2-}]}.$$

Подставляя значение $[\text{Ca}^{2+}]$ в предыдущее неравенство

$$\frac{\text{PP}_k}{[\text{CO}_3^{2-}]} < \frac{\text{PP}_c}{[\text{SO}_4^{2-}]}.$$

Это неравенство определяет условие, при котором будет выпадать именно CaCO_3 . Решив его относительно $[\text{CO}_3^{2-}]$, получим

$$[CO_3^{2-}] > \frac{PP_k}{PP_c} [SO_4^{2-}].$$

Следовательно, концентрация ионов CO_3^- (аналогично и ионов PO_4^{3-} при фосфорном режиме) в котловой воде, при которой исключается возможность образования гипсовой накипи, зависит от сульфат-ионов.

4. ЗАДАЧИ

4.1. Задачи на способы выражения концентрации

Задача 4.1. Выразить концентрацию следующих растворенных веществ, приведенную в мг/л в единицах эквивалентной концентрации: $NaCl=230$; $Ca(HCO_3)_2 = 243$; $Mg(HCO_3)_2 = 146,4$; $CaCO_3 = 15$; $Na_2SO_4 = 213$; $MgCl_2 = 508,3$; $CaSO_4 = 1928$; $MgSO_4 = 42$.

Задача 4.2. Растворимость гипса $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ изменяется по мере повышения температуры воды следующим образом:

Температура, °С	0	10	30	40	60	70	100
Растворимость, г/л ...	1,75	1,93	2,09	2,10	2,05	1,95	1,162

Построить график зависимости растворимости гипса, выраженной в мг-экв/л, от температуры.

Задача 4.3. Пересчитать нормальную концентрацию следующих ионов в объемную (мг/л и г/м³): $Ca^{2+} = 3,0$; $Mg^{2+} = 1,0$; $Cl^- = 2,4$; $SO_4^{2-} = 2,8$; $Na^+ = 1,2$.

Задача 4.4. В каком объеме воды следует растворить 106 г Na_2CO_3 , чтобы получить раствор концентрацией 1000 мг-экв/л? Плотность раствора равна 1,05.

Ответ: в 2 л, если принять эквивалентную массу соды равной 0,5 М.

Задача 4.5. Концентрация раствора $NaPO_4$ составляет 5%. Выразить ее в г/л, г-экв/л и мг-экв/л, если плотность раствора $\rho = 1,06$. Раствор фосфата предназначен для умягчения воды [осаждения ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} в виде $Ca_3(PO_4)_2$ и $Mg_3(PO_4)_2$].

Ответ: 53 г/л; 0,97 г-экв/л, 970 мг-экв/л.

Задача 4.6. Солеосодержание котловой воды равно 1200 мг/л. Выразить его в г/м³.

Задача 4.7. Доказать, что $A \text{ мг/л} = A \text{ г/м}^3$.

Задача 4.8. Анионный состав раствора следующий (в мг/л): $\text{SO}_4^{2-} = 440$ и $\text{CO}_3^{2-} = 22$ мг/л. Определить его солесодержание в мг-экв/л.

Ответ: 9,89 мг-экв/л.

Задача 4.9. Концентрация едкого натра в котловой воде составляет 7,5 мг-экв/л. Выразить ее в мг/л.

Ответ: 300 мг/л

Задача 4.10. В $2,5 \text{ м}^3$ воды растворено 125 кг тринатрийфосфата Na_3PO_4 . Определить концентрацию раствора в процентах, если удельная плотность раствора равна 1,0.

Ответ: 5,0%.

Задача 4.11. Сколько килограммов Na_2CO_3 необходимо растворить в 850 л воды, чтобы получить раствор концентрацией 10%. Плотность раствора 1,1.

Ответ: 93,5 кг.

Задача 4.12. Определить в процентах и мг-экв/л концентрацию раствора NaOH , в $0,25 \text{ м}^3$ которого содержится 25 кг едкого натра. Плотность раствора принять равной 1,1.

Ответ: 9,1%; 2500 мг-экв/л.

Задача 4.13. В 25 кг раствора сернокислого железа, предназначенного для коагуляции воды, содержится 2,0 кг FeSO_4 . Определить концентрацию раствора в процентах и мг-экв/л, если его плотность равна 1,08.

Ответ: 8%; 1137 мг-экв/л.

Задача 4.14. Сколько кубических метров нужно взять 25%-го раствора поваренной соли плотностью 1,19, чтобы приготовить 10 м^3 более разбавленного раствора этой соли концентрацией 5% и $\rho = 1,04 \text{ г/л}$?

Ответ: $1,75 \text{ м}^3$.

Задача 4.15. В $1,5 \text{ м}^3$ воды растворено 0,015 т хлористого натрия. Определить концентрацию раствора в г/л и г-экв/ м^3 .

Ответ: 10 г/л, 171,0 г-экв/ м^3 .

Задача 4.16. Приготовлен 5%-й раствор поваренной соли. Выразить его концентрацию в г-экв/л, если плотность раствора 1,04.

Ответ: 0,89 г-экв/л.

Задача 4.17. Сколько следует взять тринатрийфосфата Na_3PO_4 , чтобы приготовить 2 м^3 раствора с концентрацией 82 г/л?

Ответ: 164 кг.

Задача 4.18. Сколько килограммов сернокислого натрия содержится в 1 м^3 раствора, концентрация которого равна 10 мг-экв/л ?

Ответ: $0,71 \text{ кг/м}^3$.

Задача 4.19. При анализе речной воды установлено следующее содержание в ней ионов, мл/л : $\text{Na}^+ = 52,2$; $\text{Ca}^{2+} = 57,4$; $\text{Mg}^{2+} = 18$; $\text{SO}_4^- = 161$; $\text{Cl}^- = 35$; бикарбонатов в пересчете на $\text{CO}_3^{2-} = 68,4$. Выразить состав воды в мг-экв/л .

Задача 4.20. Руководствуясь определением эквивалента, найти величину эквивалента PO_4^{3-} в гидроксилapatите $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2$.

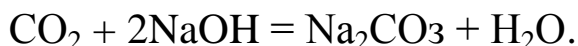
Задача 4.21. При обработке сырой воды раствором извести $\text{Ca}(\text{OH})_2$ одна из реакций в отстойнике протекает по схеме



Определить в этой реакции величину дозы CaO ($\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}(\text{OH})_2$) в мг-экв/л и количество выпадающего в осадок CaCO_3 в мг/л , если концентрация $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ равна $J_K \text{ мг-экв/л}$.

Ответ: $\text{CaO} = J_K \text{ мг-экв/л}$, $\text{CaCO}_3 = 100 J_K$.

Задача 4.22. Нейтрализация растворенной в воде углекислоты может проходить по следующим реакциям:



Определить эквивалент CO_2 для первой и второй реакции.

Ответ: 44 и 22.

Задача 4.23. Углекислые соединения натрия NaHCO_3 и Na_2CO_3 , попадая в котел, подвергаются термическому распаду по реакциям:



Получающаяся углекислота уносится паром, что является нежелательным. Определить концентрацию CO_2 в паре для случаев, когда щелочность питательной воды, равная $Щ_0 \text{ мг-экв/л}$, обуславливается: а) только NaHCO_3 ; б) только Na_2CO_3 . При определении считать, что кальцинированная сода распадается во втором случае полностью.

Ответ: а) $44Щ_0$, б) $22Щ_0$.

Задача 4.24. Используя условия и данные задач 4.22 и 4.23, определить концентрацию углекислоты в паре для случая, когда общая щелочность питательной воды $Щ_0$ обуславливается содержанием бикарбоната NaHCO_3 и карбоната Na_2CO_3 , т. е. $Щ_0 = Щ_{\bar{b}} + Щ_{\kappa}$. Кроме того, $Щ_{\bar{b}} = \alpha Щ_0$ и $Щ_{\kappa} = (1 - \alpha) Щ_0$, где α – доля общей щелочности, обусловленная присутствием бикарбоната натрия. По второй реакции (см. задачу 4.23) распадается не все количество соды, а лишь часть ее, равная x .

Ответ: $22Щ_0(\alpha + x)$ мг/л.

Задача 4.25. При Н-катионировании сырой воды в слое Н-катионита наблюдается следующая реакция:



Определить количество образующейся углекислоты, если бикарбонатная щелочность воды равна 2,5 мг-экв/л.

Ответ: 110 мг/л.

Задача 4.26. Необходимо установить бачок-мерник для отмеривания такого объема крепкой 75%-й серной кислоты ($\rho = 1,68$), который был бы достаточным для приготовления 15 м^3 разбавленного ее раствора крепостью 1,5% ($\rho \approx 1,0$). Определить полезный объем мерника в литрах.

Ответ: 178 л.

Задача 4.27. В трубопровод, по которому протекает $100 \text{ м}^3/\text{ч}$ воды, содержащей 1 мг-экв/л хлор-иона, дозируется 5%-й раствор поваренной соли с плотностью 1,04 в количестве 2 л/мин. Определить: а) прирост концентрации; б) суммарную концентрацию хлор-иона в воде в мг-экв/л.

Ответ: а) 1,07 мг-экв/л; б) 2,07 мг-экв/л.

Задача 4.28. После ввода NaOH в питательную воду паровых котлов ее щелочность увеличивается с 50 мкг-экв/л до 0,35 мг-экв/л. Определить часовой расход едкого натра, если расход питательной воды составляет 200 т/ч.

Ответ: 2,4 кг/ч.

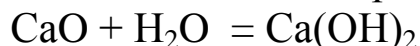
Задача 4.29. Технический тринатрийфосфат состоит из 95% $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ и 5% других примесей (главным образом соды и едкого натра). Определить процентное содержание в техническом продукте: а) иона PO_4^{3-} , б) кристаллизационной влаги.

Ответ: а) 23,8%; б) 54,0%.

Задача 4.30. Определить, сколько килограммов Na_3PO_4 и кристаллизационной воды содержится в 1 г технического тринатрийфосфата, качество которого определяется данными задачи 4-29?

Задача 4.31. Безводный хлористый кальций CaCl_2 поглощает содержащиеся в воздухе водяные пары и превращается в шестиводный $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, что широко используют на практике, в частности при консервации паровых котлов по сухому способу. Определить, сколько килограммов воды поглощает 1 кг безводного хлористого кальция?

Задача 4.32. Какое теоретическое количество воды требуется для гашения 100 кг CaO . Гашение идет по реакции



Задача 4.33. На электростанциях нередко охлаждающую конденсаторы турбин воду обрабатывают серной кислотой с целью частичного разрушения бикарбоната кальция. Разрушение протекает по следующей реакции:



Вывести формулу для определения расхода серной кислоты, если концентрация бикарбоната кальция равна \mathcal{J}_b мг-экв/л и нейтрализуется лишь доля \mathcal{J}_b , равная b .

$$\text{Ответ: } (\text{H}_2\text{SO}_4) = 49b\mathcal{J}_b \text{ г/м}^3.$$

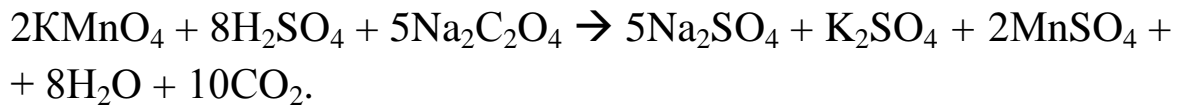
Задача 4.34. Объем раствора равен V л. Раствор содержит q_v г вещества, эквивалент которого равен \mathcal{E}_k . Определить концентрацию вещества в мг-экв/л.

Задача 4.35. Молярная концентрация раствора равна C_m . Выразить ее в процентах и в единицах объемной концентрации (мг/л), если молекулярная масса растворенного вещества равна M , а плотность раствора ρ .

Задача 4.36. Определить молекулярную массу растворенного вещества, если известны молярная C_m и объемная $C_{ок}$ концентрации одного и того же раствора.

Задача 4.37. Приготовлен раствор щелочи 1%-й концентрации. Определить, какое соединение находится в растворе, если известно, что концентрация раствора равна 250 мг-экв/л и плотность его $\rho = 1,0$?

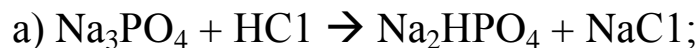
Задача 4.38. В ходе определения окисляемости воды избыток введенного щавелевокислого натрия $\text{Na}_2\text{C}_2\text{O}_4$ оттитровывают перманганатом в кислой среде по реакции



Определить эквивалентную массу KMnO_4 в данной реакции.

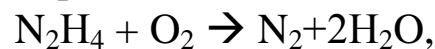
Задача 4.39. Какова эквивалентная масса солей FeSO_4 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, FeCl_3 , применяемых для коагулирования воды?

Задача 4.40. Определить эквивалентную массу тринатрийфосфата в следующих реакциях:



Ответ: 54,7 и 49,2.

Задача 4.41. Для борьбы с кислородной коррозией в водоконденсатном тракте электростанций может быть применен гидразин N_2H_4 , являющийся сильным восстановителем. Его вводят в питательную воду в виде раствора при помощи дозаторов. Гидразин может окисляться растворенным в воде кислородом по реакции

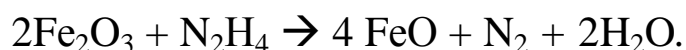
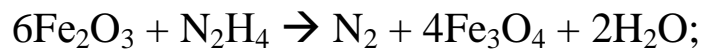


и окислами железа, присутствующими в котле,



Определить эквивалентную массу гидразина в обеих реакциях.

Задача 4.42. Восстановление окислов железа в котле гидразином при вводе его в питательную систему котлов может идти по следующим реакциям:



Определить эквивалентную массу Fe_2O_3 в этих реакциях.

Ответ: 238,5 и 79,5.

4.2. Задачи на жесткость

Задача 4.43. По химическому анализу концентрация в воде $\text{Ca}^{2+} = 100 \text{ мг/л}$ и $\text{Mg}^{2+} = 24 \text{ мг/л}$. Найти общую жесткость воды.

Задача 4.44. При анализе сырой воды было определено: $\text{Ca}^{2+} = 50 \text{ мг/л}$, $\text{Mg}^{2+} = 15 \text{ мг/л}$ и $\text{Ж}_o = 3,75 \text{ мг-экв/л}$. Точно ли выполнен анализ?

Задача 4.45. Кальциевая жесткость воды равна 3000 *мкг-экв/л*. Чему будет равна общая жесткость этой воды в *мг-экв/л*, если содержание в ней Mg^{2+} составляет 0,024 г/л?

Задача 4.46. Найти отношение $J_{\text{Ca}} : J_{\text{Mg}}$ в эквивалентных единицах, если концентрация в воде $\text{Ca}^{2+} = 43 \text{ мг/л}$ и $\text{Mg}^{2+} = 12 \text{ мг/л}$.

Задача 4.47. Требуется приготовить раствор жесткостью 500 *мкг-экв/л*. Определить, сколько необходимо для этого растворить в 1 л дистиллированной воды $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ или $\text{CaCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$.

Ответ: 61,6 *мг/л* и 54,8 *мг/л*.

Задача 4.48. В 1 л дистиллированной воды растворено, *мг-экв*: 2 CaCl_2 , 1,5 MgSO_4 , 0,7 Na_2CO_3 , 1,2 NaCl . Определить общую и карбонатную жесткость раствора.

Задача 4.49. В 1 л дистиллированной воды растворено 1,23 *мг* $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Определить жесткость раствора.

Задача 4.50. Сколько миллиграммов $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ следует растворить в 1 л дистиллированной воды, чтобы получить раствор жесткостью 10 *мг-экв/л*?

Задача 4.51. Жесткость раствора сернокислого магния равна 10 *мг-экв/л*. Сколько миллиграммов этого раствора необходимо взять, чтобы приготовить 1 л раствора жесткостью 25 *мкг-экв/л*?

Ответ: 2,5 *мл*.

Задача 4.52. Определить магниевую жесткость воды, если содержание в ней катиона кальция составляет 60 *мг/л*, а общая жесткость ее равна 4200 *мкг-экв/л*.

Ответ: $J_{\text{Mg}} = 1,2 \text{ мг-экв/л}$.

Задача 4.53. Определить жесткость содо-известкованной воды в *мг-экв/л*, если известно, что концентрация в ней ионов кальция равна 5 *мг/л*, а ионов магния 1 *мг/л*.

Задача 4.54. Жесткость питательной воды равна 10 *мкг-экв/л*. Сколько граммов CaO содержится в 1 м^3 этой воды?

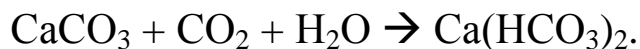
Задача 4.55. При кипячении исходной воды ее жесткость снижается за счет разложения бикарбоната кальция по реакции



Определить количество выпадающего в осадок CaCO_3 из 10 л воды, если жесткость ее при кипячении снизилась на 2,3 *мг-экв/л*.

Ответ: 1,15 г.

Задача 4.56. Определить количество CO_2 , стехиометрически необходимое для растворения 100 г CaCO_3 . Растворение протекает по реакции



Задача 4.57. Определить общую жесткость воды в мг-экв/л, если известно, что содержание в ней катиона кальция (Ca^{2+}) составляет 40 мг/л, а $\text{Ж}_{\text{Ca}} / \text{Ж}_{\text{Mg}} = 4$.

Ответ: $\text{Ж}_o = 2,5$ мг-экв/л.

Задача 4.58. Дать вывод формулы, выражающей зависимость между общей жесткостью воды (в мг-экв/л) и концентрацией катионов кальция (Ca^{2+}) и магния (Mg^{2+}), измеренной в мг/л, для любого точного анализа воды на жесткость.

Задача 4.59. Можно ли получить жесткость воды, равную 3,5 мг-экв/л, путем растворения CaCO_3 в дистиллированной воде комнатной температуры?

Задача 4.60. Какова жесткость насыщенного раствора $\text{Mg}(\text{OH})_2$ и CaCO_3 в дистиллированной воде при температуре 20-25° С?

Задача 4.61. Жесткость конденсата турбины возросла с 3 до 10 мкг-экв/л. Определить увеличение подсоса охлаждающей воды, жесткость которой 5 мг-экв/л.

Ответ: 0,14%.

Задача 4.62. В практических условиях при определении величины подсоса (P_e) обычно бывают известными жесткость конденсата начальная (Ж_k) и конечная (после возникновения подсоса - Ж_c), а также и жесткость охлаждающей воды ($\text{Ж}_{cв}$). Вывести формулу, выражающую зависимость между этими величинами и позволяющую определить величину подсоса P_e .

Ответ: $P_e = [(H_c - H_k) : (H_{cв} - H_k)] \cdot 100$.

Задача 4.63. Построить графическую зависимость допустимого подсоса P_e от жесткости охлаждающей воды. Жесткость конденсата принять: начальную - 2 и конечную - 5 мкг-экв/л.

Задача 4.64. Отношение эквивалентных количеств в исходной воде (Ca^{2+}) : (HCO_3^-) и величина кальциевой жесткости

$J_{Ca} = (Ca^{2+})$ мг-экв/л. Определить общую и магниевую жесткость воды, если некарбонатная жесткость равна $J_{НК}$ мг-экв/л.

$$\text{Ответ: } J_o = J_{Ca} / \beta + J_{НК};$$

$$J_{Mg} = J_o - J_{Ca}.$$

Задача 4.65. Жесткость известкового раствора составляет 45 мг-экв/л. Найти концентрацию $Ca(OH)_2$ в г/л.

Задача 4.66. Загрязненность технической поваренной соли, применяемой на водоочистках, соединениями кальция и магния контролируют обычно путем определения жесткости 10%-го раствора. Определить процентное содержание $CaCl_2$ в технической поваренной соли, если жесткость 10%-го ее раствора плотностью 1,073 равна 13 мг-экв/л.

$$\text{Ответ: } 0,93\%.$$

Задача 4.67. Вывести формулу для определения процентного содержания B в технической поваренной соли загрязняющих ее соединений кальция и магния по следующим данным: жесткость p %-го раствора J_o мг-экв/л, плотность раствора ρ , эквивалентная масса загрязняющего соединения $Э_k$.

$$\text{Ответ: } B = \frac{Э_k J_o}{100 \rho}, \%$$

Задача 4.68. Необходимо приготовить 2 л раствора, имеющего жесткость: магниевую 3 и кальциевую 7 мг-экв/л. Определить, какое количество $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ и $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ необходимо растворить в указанном объеме воды, чтобы получить раствор с заданной жесткостью.

$$\text{Ответ: } MgCl_2 \cdot 6H_2O = 609,72 \text{ мг};$$

$$CaCl_2 \cdot 6H_2O = 1534 \text{ мг}.$$

Задача 4.69. При одном из анализов лабораторией были получены следующие данные: а) $J_o = 7$ и $J_k = 3,5$ мг-экв/л; б) $J_o = 4,2$ и $J_k = 0,7$ мг-экв/л; в) $J_o = 10$ мкг-экв/л; г) $J_o = 3$ мкг-экв/л. В пояснении отмечено, что эти данные характеризуют различные воды, пробы которых отобраны на водоочистке. Можно ли сказать, качество каких вод водоочистки характеризуют приведенные данные.

Задача 4.70. Анализ сырой воды содержит следующие данные: $J_{\text{O}} = 4,45 \text{ мг-экв/л}$, $J_{\text{Ca}} = 0$; $J_{\text{Mg}} = 4,45 \text{ мг-экв/л}$, $\text{Mg} = 70 \text{ мг/л}$. Можно ли верить этому анализу? Дать мотивированное объяснение.

Задача 4.71. В лабораторию доставлена проба прозрачной артезианской воды, в которой требуется определить наличие кальция. Можно ли это сделать, если из реактивов имеется только бикарбонат натрия?

Задача 4.72. В пробу воды с карбонатной жесткостью $3,5 \text{ мг-экв/л}$ был прилит раствор соды, приготовленный в лаборатории. Выделения карбоната кальция не последовало. Выяснение этой аномалии вскрыло ошибку, допущенную при приготовлении раствора. В чем она могла заключаться, если учесть, что приготовленный раствор действительно был щелочным, а не жестким?

Задача 4.73. Как известно, в весьма жесткой воде (морской) трудно получить мыльную пену при мытье, например при мытье рук, и наоборот, в конденсате намыленные руки трудно отмыть от мыла. В чем причина этого явления?

4.3. Задачи на щелочность

Задача 4.74. Требуется приготовить 3 л раствора, щелочность которого должна быть: карбонатная 3 и бикарбонатная 2 мг-экв/л . Определить количество карбоната и бикарбоната натрия, которое необходимо растворить в указанном объеме.

Задача 4.75. Избыток Ca(OH)_2 в известкованной воде равен $7,4 \text{ мг/л}$. Определить величину карбонатной щелочности, если $J_{\text{O}} = 0,8 \text{ мг-экв/л}$.

Ответ: $J_{\text{K}} = 0,6 \text{ мг-экв/л}$.

Задача 4.76. Дан раствор Ca(OH)_2 концентрацией $1,5 \text{ мг-экв/л}$. Является ли он жестким или щелочным?

Задача 4.77. Щелочность сырой воды, относящейся к первой группе, равна $2,5 \text{ мг-экв/л}$. Чему будет равна карбонатная жесткость этого раствора?

Задача 4.78. В 10 л раствора содержится 740 мг Ca(OH)_2 и 600 мг NaOH . Определить щелочность и жесткость раствора.

Ответ: $J_{\text{O}} = 2 \text{ мг-экв/л}$, $J_{\text{Ca}} = 3,5 \text{ мг-экв/л}$.

Задача 4.79. Известкованная вода обычно представляет собой пересыщенный раствор углекислого кальция, который постепенно

выпадает в осадок по пути движения воды. Определить количество выпадающего в механических фильтрах CaCO_3 (в г/л фильтруемой воды), если общая щелочность известкованной воды при прохождении через эти фильтры снижается на 0,05 мг-экв/л.

Ответ: 2,5 мг/л.

Задача 4.80. Щелочность пробы конденсата пара после кипячения снизилась за счет отгонки аммиака с 240 до 50 мг-экв/л. Определить количество отогнанного аммиака.

Задача 4.81. Щелочность котловой воды, обусловленная присутствием NaOH , составляет 2 мг-экв/л. Определить содержание в котловой воде едкого натра в мг/л.

Задача 4.82. Во сколько раз необходимо упарить котловую воду, щелочность которой обусловлена NaOH и равна 5 мг-экв/л, чтобы концентрация NaOH увеличилась до 10 г/л?

Ответ: в 50 раз.

Задача 4.83. Гидратная щелочность котловой воды составляет 3 мг-экв/л, а содержание в ней иона SO_4 равно 405 мг/л. Определить отношение эквивалентных количеств (NaOH) : (Na_2SO_4).

Ответ: 0,356.

Задача 4.84. Питательная вода электростанции подщелачивается на величину 0,1 мг-экв/л. Определить расход едкого натра на подщелачивание 1 м³ питательной воды.

Задача 4.85. Требуется приготовить растворы щелочных соединений следующих концентраций (мг-экв/л):

Вариант задачи	NaOH	Na_2CO_3	NaHCO_3
а	5	3	-
б	-	8	12
в	4	6	-
г	-	15	1,5
д	2,5	4,7	-

Определить количество указанных реагентов, которое необходимо растворить в 10 л дистиллированной воды, чтобы получить заданные концентрации растворов.

Задача 4.86. Химически обработанная вода, содержащая бикарбонат аммония (NH_4HCO_3), подверглась кипячению для уда-

ления аммиака. Щелочность воды при этом изменялась с течением времени следующим образом:

время кипячения, мин	0	5	10	15
щелочность, мг-экв/л:				
$Щ_{\phi}$	-	0,3	0,2	0,15
$Щ_{o}$	1,1	0,8	0,6	0,4

Определить для каждого контрольного момента концентрацию в воде карбоната и бикарбоната аммония, считая, что эти вещества при титровании ведут себя аналогично соде и бикарбонату натрия.

Задача 4.87. Используя данные предыдущей задачи, найти количество аммиака, которое удаляется после пятиминутного кипячения 1 л воды.

Ответ: 5,1 мг/л.

Задача 4.88. Найти концентрацию в мг/л гидрата, карбоната и бикарбоната натрия для следующих значений щелочности по фенолфта-

леину и метилоранжу, выраженной в мг-экв/л:

Вариант задачи	$Щ_{m}$	$Щ_{\phi}$	Вариант задачи	$Щ_{m}$	$Щ_{\phi}$
а	6,0	3,5	д	1,2	0,2
б	8,0	2,4	е	2,4	1,2
в	5,6	3,4	ж	0,85	0,25
г	0,8	0,5	з	8,0	4,2

Задача 4.89. Найти соединение, присутствующее в растворе, щелочность и жесткость которого определяется, значениями, приведенными ниже:

Вариант задачи	$Щ_{m}$	$Щ_{\phi}$	$Ж_{o}$	Вариант задачи	$Щ_{m}$	$Щ_{\phi}$	$Ж_{o}$
а	0,5	0,5	0,5	г	1,0	0,6	1,0
б	0,8	0,4	0,8	д	0,6	0,3	0,0
в	0,8	0,5	0,0	е	0,8	0,2	0,0

Задача 4.90. Жесткость обработанной воды равна 350 мг-экв/л, а щелочность 1,6 мг-экв/л. Определить величину избыточной щелочности и состав общей щелочности, если $Щ_{\phi} = 0,95$ и $Щ_{\text{м}} = 1,6$.

Ответ: $Щ_{\text{изб}} = 1,25$ мг-экв/л; $Щ_{\text{с}} = 0,3$; $Щ_{\text{к}} = 1,3$.

Задача 4.91. По условиям задачи 4.86 общая щелочность воды при кипячении непрерывно понижалась. Дать объяснения этому явлению.

Задача 4.92. Будет ли наблюдаться тот же эффект при кипячении, о котором говорится в задаче 4.86, если взамен бикарбоната аммония в воде растворить бикарбонат натрия? Почему?

Задача 4.93. Конденсаторы паровых турбин нередко промывают раствором соляной кислоты для удаления твердых карбонатных отложений, что происходит по уравнению



Определить количество растворенного карбоната кальция, если концентрация раствора соляной кислоты, залитого в конденсатор (в количестве 12 м³), снизилась с 850 до 100 мг-экв/л.

Ответ: 450 кг.

Задача 4.94. Умягченная в результате Na-катионирования вода, общая щелочность которой обуславливается содержанием только бикарбоната натрия, подвергается кипячению, в ходе которого протекает следующая реакция:



Можно ли, определяя время от времени щелочность воды, установить момент завершения этой реакции? Дать мотивированное объяснение.

Задача 4.95. В 2 л воды содержится 158 мг бикарбоната аммония и 168 мг бикарбоната натрия. Определить в мг-экв/л: а) общую щелочность воды; б) общую щелочность после полного удаления аммиака кипячением, при котором объем воды уменьшается вдвое.

Ответ: а) 2 мг-экв/л; б) 2 мг-экв/л.

Задача 4.96. Раствор содержит 107 мг/л NH_4Cl и 79,5 мг/л Na_2CO_3 . Будет ли этот раствор щелочным, если его прокипятить до полного удаления из него аммиака?

Задача 4.97. В 3 л воды содержится 80 мг едкого натра и 106 мг кальцинированной соды. Определить $Щ_{\phi}$, $Щ_{\text{м}}$ в мг-экв/л.

Ответ: $Щ_m = 1,33$; $Щ_\phi = 1,0$.

Задача 4.98. Сколько едкого натра и бикарбоната натрия необходимо растворить в 1 л дистиллированной воды, чтобы щелочность по фенолфталеину была равна 0,5 мг-экв/л и, кроме того, $2Щ_\phi = Щ_m$.

Ответ: NaOH = 20 мг/л; NaHCO₃ = 42 мг/л.

Задача 4.99. Для анализа взяли две пробы речной воды, каждая объемом 200 мл. На титрование первой пробы с индикатором метилоранж затратили 8,2 мл 0,1-н. раствора серной кислоты. Вторую пробу после добавления в нее 10 мл той же кислоты прокипятили в течение 3 мин и охладили. Вслед за этим в нее добавили 2 капли раствора метилоранжа (после чего проба приобрела красный цвет) и некоторое количество 0,1-н. раствора NaOH до появления желтого цвета. После этого в пробу внесли 3 капли раствора фенолфталеина и оттитровали ее тем же раствором щелочи до устойчивого слабозеленоватого цвета (обратное титрование), на что израсходовали 0,6 мг-экв/л раствора. Определить величину общей и бикарбонатной щелочности воды и концентрацию в ней гуматов в мг-экв/л.

Задача 4.100. Общая щелочность сырой воды составляет 3,2 мг-экв/л, а концентрация в ней ионов [HCO₃⁻] составляет 176,9 мг/л. Присутствуют ли в этой воде гуматы?

4.4. Задачи на накипеобразование

Задача 4.101. Кальциевая жесткость раствора составляет 20 мг-экв/л. Какую следует создать в этом растворе концентрацию сульфата натрия, чтобы выпал осадок сернокислого кальция? Температура раствора 25° С.

Задача 4.102. Определить жесткость насыщенного раствора сульфата кальция при 25° С.

Задача 4.103. Дан раствор сульфата кальция жесткостью 1,0 мг-экв/л; температура раствора 25° С. Определить жесткость этого раствора после прибавления к нему кальцинированной соды в количестве 1 мг-экв/л и после ликвидации состояния пересыщения раствора.

Ответ: 0,138 мг-экв/л.

Задача 4.104. Котел паропроизводительностью 200 т/ч питают водой, кальциевая жесткость которой 10 мг-экв/л. Определить су-

точное количество (кг) вносимого в котел шлама в предположении, что кальций выпадает в форме гидроксилapatита. Продувка котла равна 3%.

Ответ: 2,47 кг.

Задача 4.105. Какой должна быть по условиям задачи 4.14 величина коэффициента накопления загрязнений в котле K_3 чтобы количество отложений в среднем по всей поверхности нагрева котла составляло 20 г/м^2 при непрерывной работе его в течение 8000 ч. Среднее паронапряжение поверхности нагрева принять равным $100 \text{ кг/(м}^2 \cdot \text{ч)}$.

Ответ: $K_3 \approx 5\%$.

Задача 4.106. Жесткость питательной воды увеличилась на 1 мкг-экв/л . Какому количеству шлама, вносимому в котел паропроизводительностью 150 т/ч за 8000 ч его работы, будет соответствовать такое повышение жесткости, если считать, что шлам выпадает в виде гидроксилapatита. Продувку котла принять равной 2%.

Ответ: $B_p = 61,2 \text{ кг}$.

Задача 4.107. При вскрытии котла в период капитального ремонта было обнаружено значительное зашламливание внутренних поверхностей нагрева, доходившее до 300 г/м^2 . Указать возможные причины, приведшие к такому загрязнению, и необходимые мероприятия по предупреждению подобных явлений впредь.

Задача 4.108. Определить толщину слоя отложений, отвечающую удельному загрязнению поверхности нагрева $\sigma = 20 \text{ г/м}^2$ при условии их равномерного распределения и плотности 2,0.

Задача 4.109. Конденсатор паровой турбины, в который поступает 120 т/ч пара, охлаждается водой, жесткость которого 6 мкг-экв/л . Присос сырой воды составляет 0,05%. Определить какое количество кальция и магния будет занесено в котел паропроизводительностью 130 т/ч за 7500 ч его работы только за счет этого присоса, если для охлаждающей воды эквивалентное отношение $(\text{Ca}^{2+}) : (\text{Mg}^{2+}) = 3 : 1$. Жесткостью конденсата пара можно пренебречь.

Ответ: $(\text{Ca}) = 40,5 \text{ кг}$; $(\text{Mg}) = 8,08 \text{ кг}$.

Задача 4.110. Используя данные задачи 4.109, определить среднюю удельную загрязненность σ поверхности нагрева котла,

равной 930 м^2 . Считать, что загрязнения представляют собой $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ и $3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2$ и $K_3 = 0,2$.

Ответ: $\sigma = 28,0 \text{ г/м}^2$.

Задача 4.111. По условиям задачи 4.110 найти толщину слоя отложений в предположении, что они распределились на 10% поверхности нагрева котла. Плотность отложений принять равной 1,8.

Ответ: $\delta = 0,0157 \text{ м}$.

Задача 4.112. Определить максимально допустимую жесткость питательной воды, при которой $\sigma = 20 \text{ г/см}^2$, для следующих условий: паропроизводительность котла 200 т/ч , величина продувки 3%, длительность периода работы котла между его очисткой 8000 ч , поверхность нагрева котла 1100 м^2 . Значение коэффициента накопления загрязнений $K_3 = 0,2$ в предположении, что отложения состоят из гидроксилпатита.

Ответ: $J_0 = 1,3 \text{ мг-экв/л}$.

Задача 4.113. Соединения железа, попадая в котел, выпадают в осадок и образуют так называемые железистые отложения, способные прикипать к поверхности труб, генерирующих пар. Считается, что содержание Fe в питательной воде котлов среднего давления не должно превышать $0,07 \text{ мг/л}$. Определить количество Fe_2O_3 , которое может быть нанесено в котел паропроизводительностью 150 т/ч , при давлении $3,8 \text{ Мн/м}^2$ (39 ат) за период работы 7500 ч и при указанной концентрации железа в питательной воде. Коэффициент накопления загрязнений K_3 принять равным единице, а величину продувки 3%.

Ответ: $V_p \approx 84$.

Задача 4.114. Анализ твердых накипных соединений, взятых из кипяточной трубы котла низкого давления, показал следующий состав: 44,8% CaO, потеря при прокаливании 35,2%. Какое соединение преимущественно присутствует в отложениях?

Задача 4.115. Какое количество 100%-й соляной кислоты будет израсходовано на растворение накипи, состав которой приведен в задаче 4.114, если поверхность нагрева котла составляет 200 м^2 , а средняя толщина отложений (плотность 2,2) по всей поверхности равна $2,0 \text{ мм}$?

Ответ: 515 кг .

Задача 4.116. Для очистки от накипи котла, поверхность нагрева которого 100 м^2 , его заполнили 4%-м раствором соляной кис-

лоты; объем раствора составлял $9,7 \text{ м}^3$. После заполнения раствор начали перемешивать насосом по замкнутой схеме. Определить концентрацию кислоты после растворения накипи, состоящей на 80% из CaCO_3 и 20% нерастворимых в кислоте соединений. Толщина отложений по всей поверхности котла составляла 2,0 мм. Плотность отложений принять равной 2,3, а раствора кислоты -1,0.

Ответ: 1,44%.

Задача 4.117. Для условий задачи 4.116 примем, что растворение карбоната кальция происходило таким образом, что за каждый час растворялась половина всего количества, которое было до начала данного часа. По мере растворения накипи, концентрация раствора будет уменьшаться. Построить график изменения концентрации раствора кислоты и определить, через сколько часов можно считать процесс кислотной промывки котла практически законченным (растворение отложений на 90 - 95%).

Задача 4.118. В сосуд, на дне которого образовался слой осадка CaSO_4 , была налита дистиллированная вода. Какова будет жесткость воды в этом сосуде после достаточного времени контакта ее с осадком при 25° ? Начальной жесткостью воды можно пренебречь.

$$PP_{\text{CaSO}_4} = 6,1 \cdot 10^{-5}.$$

Ответ: $J_0 = 15,6 \text{ мг-экв/л}$.

Задача 4.119. Для удаления плотного и прочно сцепленного со стенками сосуда слоя CaSO_4 было предложено периодически заполнять сосуд дистиллированной водой и после достаточного контакта с осадком выливать ее из сосуда, повторяя это до полного растворения осадка. Определить, сколько раз необходимо будет сменить воду в сосуде, если толщина слоя CaSO_4 составляет 2 мм, площадь его 1 дм^2 , удельная плотность 2,5 и в сосуд каждый раз заливают 1 л воды. Значение PP_{CaSO_4} взять из задачи 4.118.

Ответ: 47 раз.

Задача 4.120. Способ удаления осадка, описанный в задаче 4.119, неудобен и неэкономичен. Поэтому он был заменен другим, сущность которого заключается в следующем. В сосуд в прозрачную воду (вернее раствор CaSO_4) добавлялся концентрированный раствор кальцинированной соды. После его добавления в воде появляется осадок и через некоторое время вместо твердого слоя гипса в сосуде оказался рыхлый осадок. В воде должен быть при этом

все время избыток соды, и для ускорения процесса раствор нагревают до кипения. Объяснить, в силу каких физико-химических процессов твердый осадок перешел в рыхлый шлам? Можно ли использовать этот способ для очистки котлов от накипи?

Задача 4.121. Какой следует применить реагент, чтобы, не прибегая к кислоте, перевести в рыхлый шлам слой твердых отложений карбоната кальция, образовавшихся в сосуде?

Задача 4.122. Котел паропроизводительностью D_n т/ч питается водой жесткостью J_o мкг-экв/л. Определить количество накипеобразующих соединений, которое будет внесено в котел питательной водой за время t ч, если эквивалентная масса этих соединений равна \mathcal{E}_k , а продувка котла составляет p_n , %.

$$\text{Ответ } B_p = \frac{J_o \mathcal{E}_k t D_n (100 + p_n)}{10^3 \cdot 10^2}, \text{ кг.}$$

Задача 4.123. Доказать, что для насыщенного раствора карбоната кальция в дистиллированной воде при 25°C

$$[\text{Ca}^{2+}][\text{CO}_3^{2-}] = 4,8 \cdot 10^{-9},$$

если растворимость CaCO_3 при указанной температуре составляет 6,9 мг/л.

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. В каких единицах выражается массовая процентная концентрация вещества в растворе?
2. В каких единицах выражается объемная концентрация вещества в растворе?
3. В каких единицах выражается молярная концентрация вещества?
4. Как определяется эквивалент вещества, участвующего в реакции?
5. Какое условие отражает правильность выполнения полного анализа воды?
6. Концентрацию каких ионов отражает жесткость воды?
7. В каких единицах измеряется жесткость воды?
8. На какие виды подразделяется жесткость воды?
9. Какие ионы определяют щелочность воды?

10. В каких единицах измеряется щелочность воды?
11. На какие виды подразделяется щелочность воды?
12. Как определяется щелочность воды?
13. Какие вещества обуславливают способность воды к образованию накипи?
14. Какое условие определяет растворимость вещества в воде?
15. В чем заключаются первичный и вторичный процессы накипеобразования?

6. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белан Ф.И. Водоподготовка: Учеб. для техникумов. – М.: Энергия, 1979. – 208 с.
2. Белан Ф.И. Водоподготовка промышленных котельных /Ф.И.Белан, Г.П.Сутоцкий. – М.: Энергия, 1969. – 328 с.
3. Белоконова А.Ф. Водно-химические режимы тепловых электростанций. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 245 с.
4. Вихрев В.В. Водоподготовка /В.В.Вихрев, М.С.Шкроб. – М.: Энергия, 1973. – 416 с.
5. Водоподготовка: Процессы и аппараты. – М.: Атомиздат, 1977. – 352 с.
6. Громогласов А.А. Водоподготовка: Процессы и аппараты /А.А.Громогласов, А.С.Копылов, А.П.Пильщиков.– М.: Энергоатомиздат, 1990. – 271 с.
7. Кострикин Ю.М. Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления: Справ. /Ю.М.Кострикин, Н.А.Мещерский, О.В. Коровина. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 251 с.
8. Шкроб М.С. Водоподготовка: Учеб. для энергетических вузов и факультетов /М.С.Шкроб, В.Ф.Вихрев. – М.; Л.: Энергия, 1966. – 416 с.

Составитель
Геннадий Викторович Ушаков

КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАЧИ ПО КУРСУ «ВОДОПОДГОТОВКА» И
МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ ПО ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

Методические указания к практическому занятию
для студентов специальности 100700
«Промышленная теплоэнергетика»

Редактор Е.Л.Наркевич

ЛР № 020313 от 23.12.96

Подписано в печать 13.01.01. Формат 60x84/16.

Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Печать офсетная. Уч.-изд. л. 2,5.

Тираж 100 экз. Заказ .

Кузбасский государственный технический университет.
650026, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Типография Кузбасского государственного технического
университета. 650099, Кемерово, ул. Д.Бедного, 4А.