

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра химической технологии твердого топлива

Составители
Е. С. Ушакова,
А. Г. Ушаков

ВОДОПОДГОТОВКА

Методические материалы

Рекомендованы учебно-методической комиссией
направления подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника
в качестве электронного издания
для использования в образовательном процессе

Кемерово 2019

Рецензент

Папин А. В. – кандидат технических наук, доцент кафедры химической технологии твердого топлива.

Ушакова Елена Сергеевна

Ушаков Андрей Геннадьевич

Водоподготовка: методические указания материалы [Электронный ресурс] для обучающихся направления подготовки 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника, профиль 01 Промышленная теплоэнергетика, всех форм обучения / сост.: Е. С. Ушакова, А. Г. Ушаков; КузГТУ. – Электрон. издан. – Кемерово, 2019.

Приведено содержание практических занятий и самостоятельных работ, материал, необходимый для успешного изучения дисциплины.

Назначение издания – помощь студентам в получении знаний по дисциплине «Водоподготовка» и организация практических занятий и самостоятельных работ.

© КузГТУ, 2019,
© Ушакова Е. С.,
Ушаков А. Г.,
составление, 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
1. Методические указания к практическим работам	4
Практическая работа 1. Расчет процесса очистки воды коагуляцией и осветлением в осветлителе со слоем взвешенного осадка	4
Практическая работа 2. Расчет процесса очистки воды фильтрованием через слой зернистой загрузки в механическом фильтре	18
Практическая работа 3. Расчет процесса умягчения воды в Na-катионитовом фильтре	28
Практическая работа 4. Расчет процесса удаления из воды растворенного диоксида углерода в декарбонизаторе	47
2. Самостоятельная работа	61
Список рекомендуемой литературы	65

ПРЕДИСЛОВИЕ

Методические указания разработаны в соответствии с рабочей программой по дисциплине «Водоподготовка».

На занятии студенты должны иметь при себе линейку, карандаш, калькулятор, тетради для практических и самостоятельных работ.

Отчеты по практическим работам аккуратно оформляются в письменном виде.

При подготовке к защите практических работ, необходимо ответить на предложенные контрольные вопросы.

1. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ПРАКТИЧЕСКИМ РАБОТАМ

Практическая работа 1 РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ВОДЫ КОАГУЛЯЦИЕЙ И ОСВЕЩЕНИЕМ В ОСВЕТИТЕЛЕ СО СЛОЕМ ВЗВЕШЕННОГО ОСАДКА

Работа предназначена для ознакомления студентов с теоретическими положениями и методами расчетов установок подготовки воды для котельных и тепловых электростанций.

Поверхностные воды требуют предварительной обработки (предочистки), в результате которой освобождается вода, в первую очередь, от грубодисперсных и коллоидных примесей. Для решения этой задачи применяют коагуляцию.

Студенты по нижеприведенной методике определяют основные параметры этого процесса и основные размеры осветлителя для его проведения.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Для водоснабжения энергообъектов используют в большинстве случаев природные воды, как поверхностные (из рек, озер, прудов), так и подземные (из артезианских скважин). Все воды содержат разнообразные примеси, попадающие в воду в процессе ее естественного кругооборота в природе. Кроме того, возможно загрязнение водоисточников бытовыми и промышленными стоками.

Все примеси, загрязняющие воду, подразделяют на три вида в зависимости от размера их частиц.

Истинно растворенные примеси находятся в воде в виде ионов, отдельных молекул, комплексов или состоят из нескольких молекул. Размер этих частиц менее 10^{-6} мм. В истинно растворимом состоянии в воде находятся газы (O_2 , CO_2 , H_2S , N_2), а также катионы и анионы поступивших в воду солей: Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO^{3-} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO^{3-} , NO^{2-} .

Коллоидно-растворенные примеси имеют размеры частиц порядка 10^{-6} – 10^{-4} мм. Каждая из частиц образована большим числом молекул (их может быть несколько тысяч). Эти примеси могут быть

как органического, так и минерального происхождения. К первым относятся гуминовые вещества, вымываемые из почвы, ко вторым – кремниевые кислоты, соединения железа.

Грубодисперсные примеси имеют размер частиц более 104 мкм. Это растительные остатки, частицы песка, глины и т. д.

Примеси оказывают то или иное отрицательное воздействие на свойства воды, и поэтому должны быть удалены перед ее использованием для водоснабжения энергообъектов.

Одним из наиболее широко применяемых на практике приемов снижения содержания в воде коллоидно-растворимых и грубодисперсных примесей является седиментация (осаждение) под действием сил тяжести. Однако коллоидно-растворимые примеси, обуславливающие мутность и цветность природных вод, отличаются малыми размерами, вследствие чего их осаждение происходит крайне медленно, так как силы диффузии превалируют над силами тяжести. Поэтому коллоидные примеси воды обладают определенной агрегативной устойчивостью. Однако при нагревании или замораживании, при добавлении в воду электролитов, при наложении магнитного поля агрегативная устойчивость примесей нарушается, т. е. происходит их коагуляция.

Коагуляция примесей воды – это процесс укрупнения мельчайших коллоидных частиц, происходящий вследствие их взаимного слипания под действием сил молекулярного притяжения. Коагуляция завершается образованием видимых невооруженным глазом агрегатов (хлопьев) и отделением их от жидкой среды.

Механизм процесса коагуляции обусловлен наличием вокруг частиц гидратных оболочек или двойного электрического слоя.

Гидратные оболочки присущи гидрофильным примесям, которые представлены в основном органическими веществами. На их поверхности имеется большое количество поверхностных полярных групп, таких как OH, COOH и др., которые являются гидрофильными. Они удерживают вокруг частицы гидратную оболочку. Гидрофильные частицы несут обычно небольшие электрические заряды, как правило, под влиянием электролитов коагулируют.

Частицы ила, глины, пылевидные песчинки и подобная им взвесь природных вод являются гидрофобными примесями. Они почти лишены гидратных оболочек, но имеют двойной электрический слой и несут значительные электрические заряды. Ликвидация

или уменьшение электрического заряда частиц приводит к нарушению агрегативной устойчивости и коагуляции гидрофобных примесей.

В практике водоподготовки для очистки природных вод применяется химический метод коагулирования, основанный на введении в систему электролита – коагулянта. Действие коагулянта в воде сводится к трем основным процессам: соответственно коагуляция, флокуляция, соосаждение и сорбция.

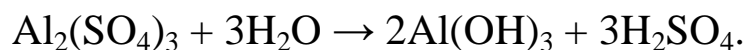
Первоначально при внесении в обрабатываемую воду коагулянта (сульфата алюминия, железного купороса и др.) происходит его диссоциация на ионы металла и анионы сильных кислот. Ионы металла, принимая участие в обмене с катионами диффузного слоя коллоидных примесей воды, способствуют снижению их агрегативной устойчивости и вследствие этого сжатию диффузного слоя. В результате формируются хлопья (в виде цепочек) из одного реагента, так как обычно в природных водах условия для его коагулирования более благоприятные, чем для примесей воды.

Затем на поверхности сформировавшихся хлопьев коагулянта адсорбируются коллоидные и истинно растворенные примеси воды. В свою очередь, цепочки коагулянта могут прилипать к поверхности крупных примесей и укрупняться при взаимном столкновении. В конечном счете образуются глобулы (хлопья). Это явление носит название флокуляции (укрупнение частиц). Кроме того, на поверхности хлопьев могут адсорбироваться растворенные органические вещества, обуславливающие привкусы и запахи воды, чем достигается определенная ее дезодорация.

Последним этапом процесса коагуляции является соосаждение укрупненных частиц коагулянта совместно с другими дисперсными примесями воды.

В качестве реагентов для коагуляции (коагулянтов) используют сернокислый алюминий $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ (глинозем), сернокислое железо $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ (железный купорос), хлорное железо $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ и сернокислое железо $\text{Fe}(\text{SO}_4)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$.

При добавлении к воде сернокислого алюминия происходит его гидролиз с образованием труднорастворимого гидроксида алюминия, который способствует слипанию коллоидных частиц и появлению в объеме воды хлопьевидной крупной взвеси.



Поскольку природные воды имеют запас щелочности, то введенный катион алюминия взаимодействует также с гидрокарбонатами с образованием гидроксида алюминия:



Гидроксиды алюминия образуют в воде соли с положительным зарядом на грануле. Эти коллоидные частицы усиливают общее коагулирующее действие введенных солей.

При недостатке щелочного резерва к воде добавляют известь или соду (подщелачивание). Оптимально подщелачивание производить известью, так как не образуется углекислота и получается наиболее высокое значение рН воды. Процесс коагулирования примесей воды можно улучшить путем удаления углекислоты из зоны реакции продувкой воздухом.

В практике водоподготовки энергообъектов наибольшее распространение в качестве коагулянта получил сульфат алюминия. Сульфат алюминия $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$ – неочищенный технический продукт, представляющий собой куски серовато-зеленого цвета, получаемые путем обработки бокситов, нефелинов или глин серной кислоты. Он должен иметь не менее 9% Al_2O_3 , что соответствует содержанию порядка 30% чистого сульфата алюминия. В нем также содержится около 30% нерастворимых примесей и до 35% воды.

Очищенный сульфат алюминия получают в виде плит серовато-перламутрового цвета из неочищенного продукта или глинозема растворением в серной кислоте. Он должен иметь не менее 13,5% Al_2O_3 , что соответствует содержанию 45% сульфата алюминия. Оба рассмотренных коагулянта перевозят навалом в закрытых железнодорожных вагонах. Для обработки воды выпускается также 23–25%-й раствор сульфата алюминия. При его применении отпадает необходимость в специальном оборудовании для растворения коагулянта, а также упрощаются и удешевляются погрузочно-разгрузочные работы и транспортирование.

В теплоэнергетике очистку природных вод от взвешенных веществ и коллоидных примесей проводят в осветлителях со слоем взвешенного осадка типов ВТИ, ЦНИИ-2 или ЦНИИ-3, которые ра-

ботают успешно только при условии предварительной обработки воды коагулянтom. Осветлители обеспечивают более высокий эффект осветления воды и имеют более высокую производительность, чем отстойники.

Принцип работы осветлителей со взвешенным осадком показан на рисунке. Обрабатываемая вода, смешанная с реагентами, вводится в осветлитель снизу и равномерно распределяется по площади рабочего коридора. Далее вода движется снизу-вверх и проходит через слой ранее сформированного взвешенного осадка, состоящего из массы взвешенных в восходящем потоке хлопьев, которые непрерывно хаотически движутся, но весь слой в целом неподвижен. Он находится в состоянии динамического равновесия, обусловленного равенством скорости восходящего потока воды и средней скорости осаждения хлопьев. а осветлителя со взвешенным слоем осадка.

При пропуске воды через взвешенный слой извлекаемые из нее примеси остаются в нем, при этом объем слоя должен непрерывно увеличиваться, но этого не происходит, так как предусматривается непрерывное удаление избыточного осадка из взвешенного слоя в осадкоуплотнитель, где он уплотняется и сбрасывается в водосток. Осветленная вода, прошедшая через слой взвешенного осадка, собирается с помощью сборных желобов или труб и отводится для дальнейшей обработки на фильтры.

Стабильная работа осветлителя достигается при постоянстве расхода и температуры обрабатываемой воды. Спонтанные колебания расхода воды вызывают размыв взвешенного слоя и вынос хлопьев в зону осветления. При колебаниях температуры воды, в особенности при поступлении более теплой, чем находящаяся в осветлителе, возникают конвективные токи, приводящие к нарушению взвешенного слоя и замутнению осветленной воды. Чтобы обеспечить нормальную работу осветлителей, допускаются в течение часа колебания расхода $\pm 10\%$ и температуры обрабатываемой воды $\pm 1^\circ\text{C}$.

При коагуляции воды в осветлителе, кроме оптимального значения температуры $25\text{--}30^\circ\text{C}$, должно строго соблюдаться ее постоянство (допустимые колебания $\pm 1^\circ\text{C}$ в час). Непостоянство температуры нарушает взвешенный слой осадка, что ведет к повышению мутности осветленной воды.

Качество коагулированной воды зависит от состава исходной воды и соблюдения оптимальных условий коагуляции в осветлителе. При нормальной работе осветлителя, налаженной технологии коагуляции качество коагулированной воды обычно получается следующим:

- остаточная перманганатная окисляемость составляет 40–30% исходной величины;
- содержание взвешенных веществ до 10 мг/л;
- прозрачность воды по шрифту более 30 см;
- остаточное содержание соединений 10–40% от исходной величины;
- остаточное содержание железа 0,03–0,3 мг/л;
- остаточное содержание алюминия менее 0,05 мг/л.

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Оптимальную дозу коагулянта можно рассчитать в зависимости от мутности воды по эмпирически установленной формуле

$$D_K = 3,5 \cdot \sqrt{M} \quad (1)$$

где D_K – доза коагулянта – безводного сернокислого алюминия $Al_2(SO_4)_3$, г/м³;

M – мутность исходной воды, мг/л.

Дозу технического $Al_2(SO_4)_3$ рассчитывают по следующей формуле

$$D_{Al_2(SO_4)_3} = \frac{100D_K}{a_{Al_2(SO_4)_3}}, \text{ г/м}^3 \quad (2)$$

где $a_{Al_2(SO_4)_3}$ – содержание $Al_2(SO_4)_3$ в техническом сульфате алюминия, %; принимают по таблице 3.

В качестве коагулянта используют сульфат алюминия $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18\text{H}_2\text{O}$, содержащий 45% сульфата алюминия, а также около 20% нерастворимых примесей и до 35% воды.

Площадь поперечного сечения контактной зоны осветлителя

$$F_{\text{КС}} = \frac{Q}{3,6v_0}, \text{ м}^2 \quad (3)$$

где Q – производительность осветлителя, $\text{м}^3/\text{ч}$;

v_0 – расчетная скорость восходящего движения воды на выходе из контактной зоны, $\text{мм}/\text{с}$.

$$v_0 = (0,6 + 0,02t)(1 - 3,5C_0)v_{\text{ч}} \quad (4)$$

где t – температура воды, подвергаемой очистке, $^{\circ}\text{C}$; принимают по таблице 3;

C_0 – объемная концентрация шлама в контактной зоне осветлителя, $\text{мл}/\text{мл}$;

$v_{\text{ч}}$ – условная скорость свободного осаждения частиц шлама, $\text{мм}/\text{с}$.

Значение $v_{\text{ч}}$ принимают по таблице 1 в зависимости от параметра $\alpha_{\text{к}}$, представляющего собой процентное содержание $\text{Al}(\text{OH})_3$ в образующемся осадке.

При использовании для коагуляции сернокислого алюминия

$$\alpha_{\text{к}} = \frac{100P_{\text{Al}(\text{OH})_3}}{P_{\text{Al}(\text{OH})_3} + M + P_{\text{н.п}}}, \% \quad (5)$$

где $P_{\text{Al}(\text{OH})_3}$ – масса выделившейся в осадок гидроокиси алюминия, $\text{мг}/\text{л}$;

M – содержание взвеси в исходной воде (мутность воды), $\text{мг}/\text{л}$;

$P_{\text{н.п}}$ – количество нерастворимых примесей, содержащихся в техническом сульфате алюминия, $\text{мг}/\text{л}$.

Масса гидроокиси алюминия, выделившаяся в осадок, равна

$$P_{Al(OH)_3} = \frac{156D_K}{342}, \quad (6)$$

где 156 и 342 – молекулярные массы соответственно гидроксида алюминия $Al(OH)_3$ и сульфата алюминия $Al_2(SO_4)_3$.

Количество нерастворимых примесей, поступающее в воду с коагулянтном, равно

$$P_{н.р} = \frac{b_{н.р} D_{Al_2(SO_4)_3}}{100}, \quad (7)$$

где $b_{н.р}$ – содержание нерастворимых примесей в техническом сульфате алюминия, %, принимают по таблице 3.

Объемную концентрацию шлама в контактной зоне осветлителя определяют по уравнению

$$C_0 = \frac{1}{\alpha_c} \sqrt{\frac{\Pi}{(100 + 1,65t)H_c}}, \text{ мл/мл} \quad (8)$$

где Π – прозрачность воды по «кресту»;

α_c – коэффициент моделирования концентрации взвеси в контактной среде осветлителя; принимают в зависимости от диаметра осветлителя по таблице 2.

H_c – приведенная высота зоны контактной среды осветлителя, см; принимают равной 200 см.

Прозрачность воды Π на выходе осветлителя определяют по следующему выражению

$$\Pi = \frac{880}{M_0}, \quad (9)$$

где M_0 – мутность очищенной воды на выходе из осветлителя, мг/л; принимают по таблице 3.

Таблица 1

Значения параметров осадка в зависимости от α_k

Величина $\alpha_k, \% \text{ мас.}$	Показатели свойств взвеси при температуре 20°C		
	$v_u, \text{ мм/с}$	$\gamma_0, \text{ мг/л}$	$100a_{\text{см}}, \text{ см}^{-1}$
3	2,25	85,0	1,70
5	2,15	65,0	2,90
10	1,95	64,0	5,50
20	1,70	15,0	7,50
30	1,45	6,0	8,10
40	1,20	4,4	8,40
50	1,00	3,5	8,50
60	0,90	2,6	8,60
70	0,85	2,4	8,65
80	0,80	2,3	8,70
90	0,75	2,2	8,75
100	0,70	2,0	8,80

Таблица 2

Значения коэффициента моделирования концентрации взвеси в контактной зоне осветлителя

$D_{oc}, \text{ м}$	4	6	8	10	12	14	16
α_c	1,00	0,93	0,88	0,85	0,82	0,80	0,78

Удельную площадь поперечного сечения шламоуплотнителя в процентах от площади поперечного сечения контактной зоны осветлителя определяют по формуле

$$B = \frac{G_{oc}}{10\gamma_0 C_0} - q_{np}, \% \quad (10)$$

где G_{oc} – количество образующегося осадка, мг/л;

γ_0 – условная объемная масса частиц в контактной зоне осветлителя, мг/мл;

C_0 – объемная концентрация осадка в контактной зоне осветлителя, мл/мл;

q_{np} – размер продувки, процент расчетной производительности осветлителя, принимают по таблице 3.

Количество осадка, образующегося при коагуляции, определяют из уравнения

$$G_{oc} = M + P_{Al(OH)_3} + P_{np}. \quad (11)$$

Площадь поперечного сечения шламоуплотнителя равна

$$F_{uy} = \frac{F_{kc} B}{100}, \text{ м}^2. \quad (12)$$

Диаметр шламоуплотнителя равен

$$d_{uy} = \sqrt{\frac{4F_{uy}}{\pi}}, \text{ м}. \quad (13)$$

Площадь осветлителя составит

$$F_{oc} = F_{kc} + F_{uy}, \text{ м}^2. \quad (14)$$

Диаметр осветлителя равен

$$d_{oc} = \sqrt{\frac{4F_{oc}}{\pi}}, \text{ м}. \quad (15)$$

Высота рабочей зоны осветлителя (зоны контактной зоны и зоны осветления) воды равна

$$H_{oc} = H_{kc} + H_{з.ос}, \quad (16)$$

где $H_{з.ос}$ – высота зоны осветления, принимают равной 200–250 см.

Расчетный размер продувки осветлителя составляет

$$Q_{np} = \frac{G_{oc} Q}{1000 \gamma_1}, \text{ м}^3/\text{ч}, \quad (17)$$

где γ_1 – весовое содержание твердой фазы в уплотненном осадке, г/л.

Весовое содержание твердой фазы в уплотненном осадке составляет

$$\gamma_1 = \frac{ap_1\tau}{2,3 \lg \left(\frac{1+ap_1\tau}{\gamma_0} \right)}, \text{ г/л} \quad (18)$$

где $p_1 = 0,6 \frac{G_{oc} Q}{10F_{шy}}, \text{ г/см}^2$;

a – коэффициент уплотнения осадка, см^{-1} ; принимают по таблице 1;
 τ – время накопления осадка; принимают по таблице 3.

Суточный расход технического сульфата алюминия:

$$G_{сут}^k = \frac{24D_{Al_2(SO_4)_3} (Q + Q_{np})}{1000}, \text{ кг/сут.} \quad (19)$$

Расчет осветлителя производят в следующем порядке:

1. По уравнению (1) определяют дозу 100% коагулянта $Al_2(SO_4)_3$, а по уравнению (2) дозу технического продукта.
2. По уравнению (5) вычисляют значение α_k и по нему, пользуясь таблице 1, определяют значения v_u , γ_0 , a .
3. По уравнению (8) вычисляют объемную концентрацию шлама в зоне контактной среды осветлителя C_0 .
4. По уравнению (4) вычисляют расчетную скорость восходящего движения воды из контактной зоны v_0 .
5. По уравнению (3) вычисляют площадь поперечного сечения контактной зоны осветлителя.

6. По уравнению (10) определяют удельную площадь поперечного сечения зоны осветления шламоуплотнителя B .

7. По уравнению (12) определяют площадь поперечного сечения шламоуплотнения $F_{шy}$, а по уравнению (13) – диаметр шламоуплотнителя.

8. По уравнению (14) определяют площадь поперечного сечения осветлителя F_{oc} , по уравнению (15) его диаметр D_{oc} , а по уравнению (16) высоту рабочей зоны осветлителя H_{oc} .

9. По уравнению (17) вычисляют весовое содержание твердой фазы в уплотненном осадке γ_1 .

10. По уравнению (17) определяют размер продувки осветлителя $Q_{пр}$.

11. По уравнению (19) определяют суточный расход коагулянта $G_{сут}^k$.

3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА

Исходные данные для различных вариантов расчета осветлителя для очистки воды от взвешенных частиц приведены в таблице 5. Данные, общие для всех вариантов расчетов, приведены в таблице 3.

Таблица 3

Технологические данные для расчета осветлителя

Наименование	Обозначение	Значение
1.Содержание $Al_2(SO_4)_3$ в техническом сульфате алюминия, %	$a_{Al_2(SO_4)_3}$	45
2.Температура воды, подвергаемой очистке, °С	t	30
3.Количество нерастворимых примесей в техническом сульфате алюминия, %	$b_{н.р}$	20
4.Мутность очищенной воды на выходе из осветлителя, мг/л	M_0	10
5.Приведенная высота контактной зоны осветлителя, см	H_c	200
6.Высота зоны осветления, см	$H_{з.ос}$	200
7.Время накопления осадка, ч	τ	6

4. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Результаты практической работы оформить в виде отчета, в котором должны быть изложены:

- наименование и вариант работы;
- исходные данные для расчетов;
- методика расчетов с результатами вычислений;
- таблица, отражающая результаты расчетов (таблица 4).

Таблица 4

Результаты расчетов

Наименование показателей	Обозначение	Значение
1. Производительность осветлителя по очищенной воде, м ³ /ч	Q	
2. Концентрация взвешенных частиц, мг/л:		
- в исходной воде	M	
- в очищенной воде	M_0	
3. Количество 100% сульфата алюминия, пошедшего на коагуляцию, г/м ³	D_k	
4. Суточный расход коагулянта, кг/сут.	$G_{сут}^k$	
5. Расчетная скорость восходящего движения потока вод на выходе из контактной зоны осветления, мм/с	v_0	
6. Диаметр, м:		
- шламоуплотнителя	$d_{шy}$	
- осветлителя	d_{oc}	
7. Высота, см:		
контактной зоны осветлителя	H_c	
зоны осветления	H_{oc}	
8. Величина продувки осветлителя, м ³ /ч	Q_{np}	
9. Концентрация взвешенных частиц в уплотненном осадке, г/л	γ_1	

Таблица 5

Исходные данные для расчетов

Номер варианта	Производительность осветлителя Q , м ³ /ч	Мутность исходной воды M , мг/л	Коэффициент моделирования взвеси α_c	Продувка осветлителя $q_{пр}$, %
1	30	100	1,0	0,1
2	60	100	1,0	0,16
3	100	100	0,96	0,28
4	150	100	0,93	0,42
5	200	100	0,9	0,55
6	30	150	1,0	0,1
7	60	150	1,0	0,16
8	100	150	0,96	0,28
9	150	150	0,93	0,42
10	200	150	0,9	0,55
11	30	200	1,0	0,1
12	60	200	1,0	0,16
13	100	200	0,96	0,28
14	150	200	0,93	0,42
15	200	200	0,9	0,55
16	30	250	1,0	0,1
17	60	250	1,0	0,16
18	100	250	0,96	0,28
19	150	250	0,93	0,42
20	200	250	0,9	0,55
21	30	300	1,0	0,1
22	60	300	1,0	0,16
23	100	300	0,96	0,28
24	150	300	0,93	0,42
25	200	300	0,9	0,55

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. На какие виды подразделяют примеси воды в зависимости от размеров их частиц?
2. В чем сущность процесса коагуляции примесей воды?
3. Как протекает процесс коагуляции коллоидных примесей?
4. Какие реагенты применяют в качестве коагулянтов в практике водоподготовки теплоэнергетических установок?

5. Напишите реакции, которые протекают при добавлении к воде сульфата алюминия.
6. Как работают осветлители со слоем взвешенного осадка?
7. Для чего создают взвешенный слой в осветлителях?
8. Какие параметры обеспечивают стабильность работы осветлителя?

Практическая работа 2

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ВОДЫ ФИЛЬТРОВАНИЕМ ЧЕРЕЗ СЛОЙ ЗЕРНИСТОЙ ЗАГРУЗКИ В МЕХАНИЧЕСКОМ ФИЛЬТРЕ

Работа предназначена для ознакомления студентов с теоретическими положениями и методами расчетов установок подготовки воды для котельных и тепловых электростанций.

Поверхностные воды требуют предварительной обработки (предочистки), в результате которой освобождается вода от грубодисперсных и коллоидных примесей. С этой целью после коагуляции и очистки в осветлителях со взвешенным слоем осадка применяют фильтрование на механических фильтрах. В большинстве случаев фильтрование является завершающим этапом предварительной очистки воды. Однако в ряде случаев очистку воды от механических и коллоидных примесей осуществляют фильтрованием без предварительной очистки.

Студенты по нижеприведенной методике определяют основные параметры процесса фильтрации и основные размеры механического фильтра для его проведения.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Сущность метода фильтрования заключается в пропускании воды, содержащей нерастворимые примеси, через фильтрующий материал, проницаемый для жидкости и не проницаемый для твердых частиц. При пропуске воды через слой зернистого материала в зависимости от заряда и соотношения размеров примесей воды и зерен фильтрующей загрузки могут происходить три вида фильтрования:

1) задержание примесей на поверхности фильтрующего слоя (пленочное фильтрование);

2) задержание примесей в порах фильтрующего слоя (объемное фильтрование);

3) одновременное образование примесями пленки и их отложение в порах загрузки.

Водоочистные сооружения, на которых осуществляется процесс фильтрования, называют фильтрами. Фильтры по виду фильтрующей среды делят на тканевые (сетчатые), каркасные (намывные) и зернистые. В технике водоснабжения наиболее широко применяют зернистые фильтры. Фильтры с зернистой загрузкой можно классифицировать по ряду основных признаков:

1) по скорости фильтрования – медленные (0,1–0,3 м/ч), скорые (5–10 м/ч) и сверхскоростные (36–100 м/ч);

2) по давлению, под которым они работают, – открытые (или безнапорные) и напорные;

3) по направлению фильтрующего потока – однопоточные, двух-поточные, многопоточные;

4) по крупности фильтрующего материала – мелко-, средне- и крупнозернистые;

5) по количеству фильтрующих слоев – одно-, двух- и многослойные.

Фильтрующая загрузка – основной рабочий элемент фильтровальных сооружений, поэтому правильный выбор ее параметров (материала загрузки, минимального, максимального и эквивалентного диаметров зерен фильтрующего материала, коэффициента формы зерен, пористости и высоты слоя загрузки) имеет первостепенное значение для нормальной работы фильтров. В таблице 1 приведены характеристики зернистых фильтрующих материалов.

Находят применение и активные фильтрующие материалы, которые благодаря своим свойствам могут извлекать из воды не только взвешенные и коллоидные примеси, но и истинно растворенные загрязнения. Так, для стабилизационной обработки воды используют мраморную крошку и магномассу. Все более широко применяют активные угли для извлечения из воды веществ, обуславливающих привкусы и запахи. Используют природный ионообменный материал цеолит для удаления из воды растворенных соединений фтора и азота. Доступность и дешевизна этого материала позволяют все бо-

лее широко применять его в качестве загрузки фильтровальных аппаратов.

Таблица 1

Характеристика фильтрующих материалов

Материал	Плотность, г/см	Пористость загрузки, %	Коэффициент-формы зерен
Кварцевый песок	2,6–2,65	40–42	1,17
Антрацит дробленый	1,6–1,7	45	1,15
Керамзит			
дробленый	1,2–1,5	58–62	1,7–2,5
недробленый	1,7–1,8	45	1,3
Горелые породы	2,4–2,5	52	2
Шунгизит дробленый	1,5–1,8	56–58	1,7–2,0
Доменные шлаки	2,6	42–44	–

Момент работы фильтра, когда потеря напора в фильтрующей загрузке достигает предельно допустимой величины или начинает ухудшаться качество фильтрата, служит сигналом для выключения фильтра на промывку, для восстановления задерживающей способности загрузки, которую производят обратным током фильтрованной воды или воздуха и воды. Вода подается на промывку специальным промывным насосом из резервуара фильтрованной воды.

Промывка фильтров является вспомогательным процессом, однако она может оказать решающее влияние на нормальный режим работы фильтров. Если в процессе промывки фильтрующая загрузка отмывается недостаточно, то это приводит к постоянному накоплению остаточных загрязнений, что сокращает фильтроцикл, а иногда и вовсе выводит фильтр из работы. Поэтому основная задача промывки фильтров – установление такого относительного расширения слоя загрузки, при которых обеспечивается практически полная отмывка зерен загрузки от прилипших к ним в процессе фильтрования загрязнений.

Серийно выпускаются напорные фильтры восьми типоразмеров (таблица 2). Высота фильтрующей загрузки в фильтрах всех размеров принята 1,2 м. Наибольший диаметр напорного фильтра из условий удобства перевозки железнодорожным транспортом принят 3,4 м, фильтрующая площадь такого фильтра составляет 7,1 м. По-

этому при значительной производительности водоочистной установки часто приходится принимать большое число фильтров.

В теплоэнергетике на водоподготовительных установках (ВПУ) механические фильтры устанавливают для удаления взвешенных веществ, как правило, так как очень редки случаи, когда из воды требуется удаление только взвешенных веществ и не применяется коагуляция в осветлителях.

Таблица 2

Характеристика осветлительных фильтров

Тип фильтра	Шифр	Завод изготовитель	Диаметр, мм	Строительная высота, мм	Масса фильтра без арматуры, кг	Нагрузочная масса, т
Вертикальный	ФОВ-1,0-6	БиКЗ	1000	2964	897	4,0
	ФОВ-1,0-6	БнКЗ	1000	3040	952	3,5
	ФОВ-1,4-6	БиКЗ	1400	3392	1544	5,5
	ФОВ-1,5-6	БиКЗ	1500	3357	1576	8,5
	ФОВ-2,0-6	ТКЗ	2000	3630	2080	15,0
	ФОВ-2,6-6	ТКЗ	2600	4015	3690	28,0
	ФОВ-3,0-6	ТКЗ	3000	4385	4729	37,0
	ФОВ-3,4-6	ТКЗ	3400	4545	6276	50,0

Примечание: БнКЗ – Бийский котельный завод; ТКЗ – Таганрогский котельный завод.

В ВПУ широко применяют напорные однопоточные фильтры с загрузкой кварцевым песком или дробленым антрацитом, или в тех же фильтрах используют двухслойную загрузку: антрацит и кварцевый песок. Механические фильтры (вертикальные или горизонтальные) с загрузкой антрацитом или кварцевым песком с высотой слоя загрузки $H_{сл} < 1$ м применяют при очистке воды, содержащей до 50 мг/л взвешенных веществ. При содержании в воде взвешенных веществ от 50 до 100 мг/л применяют механические фильтры с двухслойной загрузкой: 1) кварцевый песок с эквивалентным диаметром частиц $d_3 = 0,5–1,2$ мм, высота слоя загрузки $H_{сл} = 0,7–0,8$ м; дробленый антрацит с эквивалентным диаметром частиц $d_3 = 0,8–1,8$ мм, высота слоя загрузки $H_{сл} = 0,4–0,5$ м.

При производительности установки более 70 м³/ч устанавливают не менее четырех фильтров. Во время промывки одного из

фильтров увеличение скорости фильтрования допускается не более 30%.

Рассматривают два режима работы механических фильтров: нормальный при работе всех фильтров с периодическим отключением одного на промывку и форсированный, когда один фильтр в ремонте, а второй периодически отключается на промывку. Отключение фильтра на промывку производят при уменьшении прозрачности фильтрата до 20 см по шрифту или чаще при увеличении потери напора на фильтрах до 6–8 м вод. ст. При небольшом содержании взвешенных веществ промывки осуществляют редко (1 раз в 1–3 суток).

Для взрыхляющей промывки фильтрующей загрузки обязательно применение осветленной воды после фильтров. Промывка механических фильтров может осуществляться из бака, расположенного на отметке, достаточной для преодоления сопротивления механического фильтра и трубопроводов. Емкость бака должна обеспечить промывку фильтра и иметь запас еще на одну промывку сверх расчетного числа. Бак должен заполняться за время, не большее, чем интервалы между промывками фильтров. Допускается производить промывку фильтров из трубопровода осветленной воды, если забор воды не превышает 50% расхода воды на фильтрах.

При промывке фильтров насосами из баков осветленной воды емкость последних должна предусматривать этот расход и запас воды еще на одну промывку.

Для однослойных фильтров, загруженных кварцевым песком, рекомендуется применять водно-воздушную промывку в следующем режиме: продувка воздухом с интенсивностью 15–20 л/(с·м²) в течение 1–2 мин., затем совместная водно-воздушная промывка с интенсивностью подачи воздуха 15–20 л/(с·м²) и воды 3–4 л/(с·м²) в течение 4–5 мин. и последующая подача воды с интенсивностью 6–8 л/(с·м²) в течение 4–5 мин.

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Расчетную скорость фильтрования при нормальном режиме работы фильтров (все фильтры работают, один находится в резерве) определяют из уравнения

$$\omega'_H = \frac{10^3 n P}{24 C_{oc}}, \text{ м/ч} \quad (1)$$

где n – количество необходимых для каждого фильтра промывок за сутки; для одного фильтра количество промывок должно быть не больше 3;

C_{oc} – концентрация взвешенных частиц в воде, поступающей на фильтрование, мг/л;

P – грязеемкость загрузки, кг/м².

Грязеемкость фильтрующей загрузки слоем 1 м при фракционном составе 0,6–1,4 мм равна в среднем 2,5 кг/м.

Расчетную суммарную площадь фильтрования определяют из уравнения

$$F' = \frac{Q \alpha}{\omega'_H}, \text{ м}^2 \quad (2)$$

где Q – производительность фильтров по осветленной воде, м³/ч;

α – коэффициент, учитывающий расход воды на собственные нужды механических фильтров, ориентировочно принимают равным 1,1, затем уточняют.

Площадь фильтрования F_ϕ и диаметр d_ϕ каждого фильтра определяют путем подбора соответствующей площади фильтрования и диаметра стандартных фильтров, выпускаемых заводами.

Расчетную площадь одного фильтра определяют по уравнению

$$F'_\phi = \frac{F'}{(a-1)}, \text{ м}^2 \quad (3)$$

где $(a-1)$ – количество работающих фильтров; один фильтр находится в резерве.

Выбирают стандартный фильтр, имеющий ближайшее значение площади фильтрования, и принимают фактические значения диаметра фильтра d_ϕ и площади фильтрования F_ϕ .

Площади фильтрования стандартных фильтров насыпного типа в зависимости от диаметра приведены в таблице 3.

Таблица 3

Диаметры и площади фильтрования стандартных фильтров

Диаметр фильтра	700	1000	1500	2000	2600	3000	3400
Площадь фильтрования F_{ϕ} , м ²	0,39	0,76	1,72	3,1	5,2	6,95	9,1

Для выбранных стандартных фильтров определяют фактическую скорость фильтрования при нормальном режиме (все фильтры работают, один в резерве).

$$\omega_H = \frac{Q+q}{F_{\phi} (a-1)}, \quad (4)$$

где q – среднечасовой расход воды на собственные нужды, м³/ч.

Скорость фильтрования при форсированном режиме (один фильтр находится на промывке, один – в резерве) определяют из уравнения

$$\omega_{\phi} = \frac{Q+q}{F_{\phi} (a-2)}, \quad (5)$$

где 2 – число отключенных фильтров.

Если полученное значение ω_H и ω_{ϕ} превышает скорость фильтрования при соответствующем режиме, допустимую в таблице 4, необходимо увеличить диаметр фильтра либо количество установленных фильтров.

Расход воды на одну отмывку механического фильтра

$$d = \frac{60itF_{\phi}}{1000}, \text{ м}^3 \quad (6)$$

где i – интенсивность взрыхляющей промывки фильтра, л/(с·м²);
 t – продолжительность взрыхляющей промывки фильтра, мин.

Значения i и t принимают по таблице 4 в зависимости от используемого типа загрузки фильтра.

Среднечасовой расход воды на собственные нужды

$$q = \frac{dn(a-1)}{24}, \text{ м}^3/\text{ч} \quad (7)$$

Расчет механических фильтров производят в следующем порядке:

1. Определяют расчетную скорость фильтрования при нормальном режиме по уравнению (1).
2. Определяют расчетную суммарную площадь фильтрования по уравнению (2).
3. Принимают общее количество устанавливаемых фильтров.
4. Определяют расчетную площадь одного фильтра по уравнению (3).
5. Принимают фактическое значение площади фильтрования фильтра по таблице 3 (принимают ближайшее к расчетному значение площади фильтрования стандартного фильтра).
6. Определяют расход воды на промывку одного механического фильтра по уравнению (6).
7. Определяют среднечасовой расход воды на собственные нужды по уравнению (7).
8. Определяют фактическую скорость фильтрования при нормальном режиме по уравнению (4).
9. Если фактическая скорость фильтрования превышает скорость фильтрования при нормальном режиме, допустимую в таблице 4, увеличивают диаметр фильтра, либо количество фильтров и вновь проводят расчеты.
10. Определяют скорость фильтрования при форсированном режиме по уравнению (5).
11. Если полученное значение превышает скорость форсированном режиме, допустимую в таблице 4, увеличивают диаметр фильтра, либо количество фильтров и вновь проводят расчеты.

3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТОВ

Исходные данные для различных вариантов расчета механического фильтра приведены в таблице 4. Данные, общие для всех вариантов расчетов, приведены в таблице 5.

Таблица 4

Исходные данные для расчетов

№ варианта расчета	Расход очищенной воды Q , м ³ /ч	Концентрация взвешенных веществ в воде, подвергаемой очистке, мг/л	Число промывок фильтра в сутки n	Количество Устанавливаемых фильтров a
1	30	10	1	5
2	60	10	1	4
3	100	10	1	4
4	150	10	1	5
5	200	10	1	6
6	30	30	1	5
7	60	30	1	4
8	100	30	1	4
9	150	30	1	5
10	200	30	1	6
11	30	50	1	5
12	60	50	1	4
13	100	50	1	4
14	150	50	1	5
15	200	50	1	6
16	30	75	3	5
17	60	75	3	5
18	100	75	3	5
19	150	75	3	6
20	200	75	3	7
21	30	100	3	5
22	60	100	3	5
23	100	100	3	5
24	150	100	3	6
25	200	100	3	7

Таблица 5

Технологические данные для расчета механических фильтров

Параметр	Загрузка фильтра	
	кварцевым песком	антрацитом
Диаметр фильтрующего материала, мм	0,5–1,2	0,6–1,4
Высота фильтрующего слоя	1,0	1,0
Насыпная масса фильтрующего материала	1,6	0,8
Скорость фильтрования, м/ч		
нормальный режим	5	5
форсированный режим	7,5	7,5
Интенсивность взрыхляющей промывки, л/(с·м ²)	12	12
Продолжительность взрыхляющей промывки, мин.	20	20

4. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Результаты практической работы оформить в виде отчета, в котором должны быть изложены:

- наименование и вариант работы;
- исходные данные для расчетов;
- методика расчетов с результатами вычислений;
- таблица, отражающая результаты расчетов (таблица 6).

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Для чего применяется метод очистки воды фильтрованием?
2. В чем заключается сущность метода фильтрования?
3. Как классифицируются фильтры для механической очистки воды?
4. Какие материалы применяют для очистки воды фильтрованием?
5. Какие показатели определяют эффективность очистки воды методом фильтрования?
6. Для чего применяют промывку фильтрующего механического фильтра?

7. Как осуществляют промывку фильтрующего слоя механического фильтра?

8. Для чего применяют сжатый воздух при промывке фильтрующего слоя механического фильтра?

9. Что называют фильтроциклом в процессе работы механического фильтра?

10. Какие фильтры применяют на ВПУ в теплоэнергетике?

Таблица 6

Результаты расчетов

Наименование показателей	Обозначение	Значение
1. Расход очищенной воды, м ³ /ч	Q	
2. Расход воды на собственные нужды, м ³ /ч	q	
3. Концентрация взвешенных веществ в воде, подвергаемой очистке, мг/л	C_{oc}	
4. Количество установленных фильтров, включая резервный	a	
5. Диаметр фильтров, мм	d_{ϕ}	
6. Скорость фильтрации: в нормальном режиме работы, м/ч; в форсированном режиме, м/ч	ω_n ω_{ϕ}	
7. Число регенераций каждого фильтра в сутки	n	

Практическая работа 3

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА УМЯГЧЕНИЯ ВОДЫ В НА-КАТИОНИТОВОМ ФИЛЬТРЕ

Работа предназначена для ознакомления студентов с теоретическими положениями и методами расчетов установок подготовки воды для котельных и тепловых электростанций.

Растворенные в воде вещества вызывают те или иные неполадки в работе энергетического оборудования. В основном это связано с образованием в тепловых агрегатах накипных отложений и коррозии. Основной причиной отложений накипи является наличие

в подпиточной и сетевой воде растворимых соединений кальция и магния – бикарбонатов, сульфатов и хлоридов, являющихся накипеобразователями. Эти соединения не удаляются из воды на стадиях ее предварительной обработки методами коагуляции, осветления и фильтрации. Для удаления растворимых соединений кальция и магния воду после осветления и фильтрации подвергают умягчению методами ионного обмена.

Студенты по нижеприведенной методике определяют основные параметры процесса умягчения и основные размеры ионообменного фильтра для его проведения.

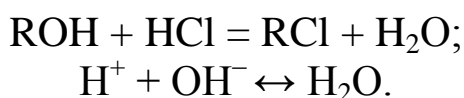
1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Обработка воды методами ионного обмена основана на пропуске исходной или частично обработанной воды через фильтрующий слой ионообменного материала, практически нерастворимого в воде, но способного взаимодействовать с содержащимися в обрабатываемой воде ионами. Материалы, обладающие свойством обменивать катионы, называются катионитами, а материалы, обладающие свойством обменивать анионы, – анионитами. Чтобы получить нужную ионную форму ионита, проводят регенерацию.

Катиониты при регенерации их растворами NaCl, H₂SO₄, NH₄Cl образуют соответственно натриевую, водородную или аммонийную формы, которые условно можно обозначить следующим образом: NaR, HR, NH₄R.

При пропуске обрабатываемой воды, содержащей катионы Ca²⁺ и Mg²⁺, через отрегенированный катионит протекают реакции обмена ионов Ca²⁺ и Mg²⁺ на ионы Na⁺, H⁺ или NH₄⁺, содержащиеся в катионите; этот процесс называется катионированием.

Аниониты, отрегенированные щелочью (NaOH и др.), образуют гидроксильную форму, условно обозначенную ROH. Если через отрегенированный анионит пропускать раствор кислоты, например, HCl, произойдет реакция обмена анионов (анионирование) и осуществится взаимная нейтрализация ионов H⁺ (кислоты) и ионов OH⁻, вытесненных анионами из анионита.



По своей химической природе все катиониты являются кислотами, все аниониты – основаниями. В зависимости от состава функционально активных групп различают типы ионитов по кислотности (или основности), катиониты подразделяют на сильно-, средне- и слабокислотные, соответственно аниониты на сильно-, средне- и слабоосновные. По своим технологическим свойствам они имеют существенные различия (таблица 1).

Таблица 1

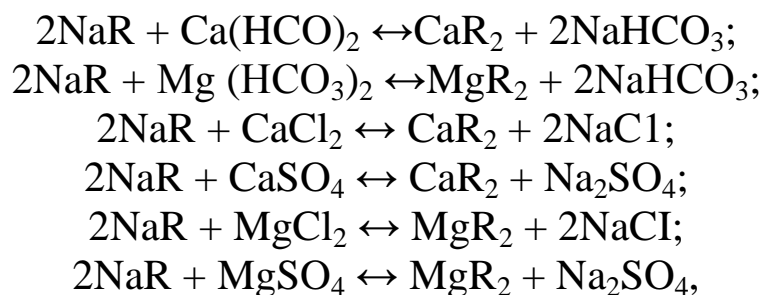
Технологическая характеристика ионообменных материалов

Марка ионита	Размер зерен, мм	Насыпная масса, т/м ³		Полная обменная емкость, г-экв/м ³
		товарного продукта	в набухшем состоянии	
Катиониты				
Сульфоуголь 1 сорт				
крупный СК-1	0,5–1,2	0,67–0,7	-	500
мелкий СМ-1	0,25–0,7	0,69–0,79	-	570
Катионит КУ-1	0,3–2,0	0,6–0,73	0,33	650
Катионит КУ-2-8	0,315–1,25	0,7–0,88	0,34	1700
Катионит КБ-4-П2	0,25–1,0	0,68–0,82	0,17–0,33	2800
Аниониты				
Анионит АН-31	0,4–2,0	0,72–0,75	0,31	1500
Анионит АВ-17-8	0,355–1,25	0,74	0,33	800

Слабоосновными анионитами задерживаются только анионы сильных кислот, анионы слабых кислот HSiO^{3-} и HCO^{3-} удаляются только сильноосновными анионитами.

На ВПУ энергетических объектов применяют катиониты: сульфоуголь (наиболее дешевый), катионит КУ-2 (термостойкий), реже катионит КУ-1 и слабокислотный КБ-4-П2. Сильнокислотные катиониты КУ-2 и КУ-1 незначительно понижают обменную емкость с понижением $\text{pH} < 7$. Слабокислотные катиониты проявляют способность к обмену ионов при $\text{pH} > 7$.

Метод Na-катионирования основан на пропуске обрабатываемой воды через Na-форму катионита, для чего предварительно катионит регенерируется поваренной солью (NaCl). При Na-катионировании воды протекают следующие реакции:



где NaR, CaR₂, MgR₂ – солевые формы катионита.

Как видно из приведенных реакций, из обрабатываемой воды удаляются катионы Ca²⁺ и Mg²⁺, а в обрабатываемую воду поступают ионы Na⁺, анионный состав воды при этом не изменяется.

Одноступенчатым Na-катионированием можно получить воду с остаточной жесткостью до 0,1 мг-экв/л, однако для получения более глубокоумягченной воды (с остаточной жесткостью 0,01–0,02 мг-экв/л) требуется существенно увеличивать удельный расход соли на регенерацию фильтра, причем необходим тщательный контроль за «проскоком» жесткости. В схеме двухступенчатого Na-катионирования все эти недостатки устраняются и надежно обеспечивается остаточная жесткость фильтрата менее 0,01 мг-экв/л.

Число ступеней катионирования определяется требованиями к обработанной воде. Для паровых экранированных котлов, где требуется глубокое умягчение воды, целесообразно применение схемы двухступенчатого Na-катионирования. Для горячего водоснабжения, если требуется частичное умягчение воды, достаточно одной ступени катионирования.

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА

2.1. Расчет Na-катионитовых фильтров первой ступени

Расчет Na-катионитных фильтров начинают обычно с подбора диаметра выпускаемых промышленностью фильтров по скорости фильтрования.

Расчетную суммарную площадь фильтрования F (м²) определяют из уравнения

$$F' = \frac{Q\alpha}{\omega'_n}, \quad (1)$$

где Q – производительность фильтров по осветленной воде, м³/ч;

α – коэффициент, учитывающий расход воды на собственные нужды механических фильтров; ориентировочно принимают равным 1,1, затем уточняют;

ω'_n – расчетная скорость фильтрования, м/ч; принимают по таблице 2 в зависимости от жесткости исходной воды.

Таблица 2

Расчетная скорость фильтрования

Жесткость исходной воды J_0 , мг-экв/л	1	2,5	5	7,5	10	15
Расчетная скорость филь- трования ω'_n , м/ч	24	22,5	20	17,5	15	10

Площадь фильтрования F_ϕ и диаметр d_ϕ каждого фильтра определяют путем подбора соответствующей площади фильтрования и диаметра стандартных фильтров, выпускаемых заводами.

Определяют расчетную площадь одного фильтра по уравнению

$$F'_\phi = \frac{F'}{(a-1)}, \quad (2)$$

где $(a-1)$ – количество работающих фильтров. Количество фильтров 1 ступени принимают не менее трех (два работающих и один резервный).

Выбирают стандартный фильтр, имеющий ближайшее значение площади фильтрования и принимают фактические значения диаметра фильтра d_ϕ и площади фильтрования F_ϕ .

Площади фильтрования стандартных ионообменных фильтров в зависимости от диаметра приведены в таблице 3.

Таблица 3

Диаметры и площади фильтрования стандартных фильтров

Диаметр фильтра, мм	700	1000	1500	2000	2600	3000	3400
Площадь фильтрования F_{ϕ} , м ²	0,39	0,76	1,72	3,10	5,20	6,95	9,10

Высоту слоя катионита в фильтре определяют по формуле

$$H_{сл} = \frac{24 J_o Q}{(a-1) F_{\phi} n E_p^{Na}}, \text{ м} \quad (3)$$

где n – число регенераций каждого фильтра в сутки;

J_o – общая жесткость воды, поступающей на Na-катионитные фильтры, мг-экв/л;

$H_{сл}$ – высота слоя катионита, м;

E_p^{Na} – рабочая обменная емкость катионита при Na-катионировании, г-экв/м³, определяют по формуле

$$E_p^{Na} = \alpha_{Na} \beta_{Na} E_{пол} - 0,5 q_{уд} J_o, \quad (4)$$

где α_{Na} – коэффициент эффективности регенерации Na – катионита;

β_{Na} – коэффициент, учитывающий снижение обменной емкости катионита по Ca и Mg вследствие влияния ионов Na⁺, содержащихся в исходной воде;

$q_{уд}$ – удельный расход воды на отмывку катионита, м³ на 1 м³ катионита;

$E_{пол}$ – полная обменная емкость катионита, г-экв/м³;

0,5 – доля умягчения отмывочной воды.

Высота слоя катионита должна быть равна $H_{сл} = 1,5\text{--}2,5$ м. В противном случае изменяют число фильтров, диаметр фильтров или

количество регенераций фильтра в сутки и расчеты повторяют вновь.

Значение коэффициента α_{Na} зависит от удельного расхода NaCl на регенерацию катионита q_c , определяют по таблице 4. В свою очередь значения q_c зависят от исходной жесткости воды, определяют из таблицы 5.

Таблица 4

Зависимость коэффициента эффективности регенерации α_{Na} от удельного расхода соли q_c на регенерацию

q_c	100	150	200	250	300
α_{Na}	0,62	0,74	0,81	0,86	0,90

Таблица 5

Удельный расход NaCl на регенерацию катионита

Жесткость исходной воды J_o , мг-экв/л	1,0	2,5	5,0	7,5	10,0	15,0
Удельный расход NaCl на регенерацию катионита q_c , г/г-зкв	120	120	120	150	187,5	225

Значения коэффициента β_{Na} зависят от отношения концентрации ионов натрия (мг-экв/л) в исходной воде к ее жесткости и приведены в таблице 6.

Обычно концентрацию ионов натрия в воде выражают в мг/л. Чтобы выразить концентрацию (мг-экв/л), нужно это значение разделить на эквивалент натрия, т. е. на 23.

Таблица 6

Значения коэффициента снижения обменной емкости катионита

β_{Na}

C_{Na} / J_o	0,01	0,05	0,1	0,5	1	5	10
β_{Na}	0,93	0,88	0,83	0,7	0,65	0,54	0,5

Примечание: C_{Na} – концентрация Na^+ в исходной воде, мг-экв/л.

Значения удельного расхода воды на отмывку катионита $q_{уд}$ и полная обменная емкость катионита $E_{пол}$ приведены в таблице 7.

Регенерацию катионита производят технической поваренной солью. Расход 100% поваренной соли на одну регенерацию Na-катионитного фильтра определяют по формуле

$$Q_c^{Na} = \frac{E_p^{Na} F_\phi H_{сл} q_c}{1000}, \text{ кг} \quad (5)$$

где q_c – удельный расход соли на регенерацию обменной емкости катионита, г/г-экв.

Расход технической соли в сутки определяют по формуле

$$Q_{m.c} = \frac{Q_c^{Na} n(a-1) \cdot 100}{p}, \text{ кг/сут} \quad (6)$$

где p – содержание NaCl в технической соли, приведено в таблице 7, %.

Расходы воды на регенерацию Na-катионитного фильтра складываются из расходов воды на взрыхляющую промывку, приготовление регенерационного раствора, отмывку катионита от продуктов регенерации и избытка NaCl.

Взрыхление слоя катионита необходимо для устранения слеживаемости и удаления измельченных частиц катионита. Расход воды на одну взрыхляющую промывку фильтра определяют по формуле

$$Q_{взр} = \frac{60 i t_{взр} F_\phi}{1000}, \text{ м}^3 \quad (7)$$

где i – интенсивность взрыхляющей промывки фильтров, л/(см²); принимают по таблице 7;

$t_{взр}$ – продолжительность взрыхляющей промывки, мин.; принимают по таблице 7.

Расход воды на приготовление регенерационного раствора соли определяют из уравнения

$$Q_{p.p} = \frac{Q_c^{Na} \cdot 100}{1000 b_{p.p} \rho_{p.p}}, \text{ м}^3 \quad (8)$$

где $b_{p.p}$ – концентрация регенерационного раствора, %; принимают по таблице 7;

$\rho_{p.p}$ – плотность регенерационного раствора, т/м³; принимают по таблице 7.

Расход воды на отмывку катионита от продуктов регенерации определяют из уравнения

$$Q_{от} = q_{уд} F_{\phi} H_{сл}, \text{ м}^3 \quad (9)$$

где $q_{уд}$ – удельный расход воды на отмывку катионита, м³ на 1 м³ катионита; принимают по таблице 7.

Расход воды на одну регенерацию фильтра составляет

$$Q_{с.н.}^{\phi} = Q_{взр} + Q_{p.p} + Q_{от}, \text{ м}^3. \quad (10)$$

Среднечасовой расход воды на собственные нужды На-катионитовых фильтров определяют из уравнения

$$Q_{с.н.} = \frac{Q_{с.н.}^{\phi} (a-1)n}{24}, \text{ м}^3/\text{ч}. \quad (11)$$

Фактическая скорость фильтрования при нормальном режиме работы фильтров

$$\omega_n = \frac{Q + Q_{с.н.}}{F_{\phi} (a-1)}. \quad (12)$$

Фактическая скорость фильтрования при форсированном режиме работы фильтров (один фильтр на регенерации и один в резерве)^

$$\omega_{\phi} = \frac{Q + Q_{c.н}}{F_{\phi}(a-2)}. \quad (13)$$

Время между регенерациями фильтра определяют из уравнения

$$T_{Na} = \frac{24}{n} - \frac{t_{рег}^{Na}}{60}, \quad (14)$$

где T_{Na} – межрегенерационный период каждого Na-катионитного фильтра, ч;

n – количество регенераций каждого фильтра в сутки;

$t_{рег}^{Na}$ – время регенерации фильтра, мин.

Время регенерации фильтра определяют по формуле

$$t_{рег}^{Na} = t_{взр} + t_{p.p} + t_{от}, \text{ мин.} \quad (15)$$

где $t_{взр}$ – продолжительность взрыхляющей промывки, мин.; принимают по таблице 7;

$t_{p.p}$ – время пропуска регенерационного раствора через фильтр, определяют из уравнения

$$t_{p.p} = \frac{Q_{p.p}}{\omega_{p.p} F_{\phi}} \cdot 60, \text{ мин.} \quad (16)$$

где $Q_{p.p}$ – количество регенерационного раствора, м³;

$\omega_{p.p}$ – скорость пропуска регенерационного раствора, м/ч; принимают по таблице 7.

Время отмывки от продуктов регенерации определяют из уравнения

$$t_{om} = \frac{Q_{om} 60}{\omega_{om} F_{\phi}}, \text{ мин.} \quad (17)$$

где ω_{om} – скорость отмывки, м/ч; принимают по таблице 7.

Количество одновременно регенерируемых фильтров определяют по уравнению

$$n_{o.p} = \frac{nat_{рег}^{Na}}{24}, \quad (18)$$

где n – количество регенераций каждого фильтра;

a – количество одновременно работающих фильтров.

Установить совпадение регенераций, т. е. когда $n_{o.p} > 1$, важно при автоматизации фильтров для определения количества устанавливаемых командных электрических приборов (КЭП).

2.2. Расчет Na-катионитовых фильтров второй ступени

Расчет Na-катионитных фильтров второй ступени аналогичен расчету фильтров первой ступени. В отличие от фильтров первой ступени при расчете Na-катионитных второй ступени принимают жесткость обрабатываемой воды 0,1 мг-экв/л, скорость фильтрования до 40 м/ч, высоту слоя катионита 1,5 м, удельный расход соли на регенерацию катионита 300–400 г/г-экв, концентрацию регенерационного раствора 8–12 %, рабочую емкость поглощения сульфогля 250–300 г-экв/м³. Жесткость фильтрата после второй ступени Na-катионирования принимают равной 0,01 мг-экв/л.

2.3. Расчет стоков, сбрасываемых от Na-катионитовых фильтров

При регенерации Na-катионитных фильтров кроме солей, содержащихся в исходной воде, сбрасываются продукты регенерации фильтров – CaCl_2 и MgCl_2 , а также избыток поваренной соли, который берется для более глубокой регенерации фильтрующего мате-

риала. При проведении операции взрыхления возможно попадание в сток измельченного фильтрующего материала; используемая для регенерации техническая поваренная соль содержит до 7% различных примесей, которые также поступают в сток.

Количество воды, сбрасываемое в сутки от Na-катионитных фильтров, определяют по уравнению

$$Q_{сут}^{Na} = Q_{с.н} (a-1)n, \text{ м}^3/\text{сут.} \quad (19)$$

Количество продуктов регенерации CaCl_2 и MgCl_2 , сбрасываемых за одну регенерацию фильтра определяют по уравнению

$$\mathcal{K}_p = \frac{F_{\phi} H_{сл} E_p^{Na}}{1000}, \text{ кг-экв.} \quad (20)$$

Долю солей Ca и Mg в регенерируемом фильтре принимают в том же соотношении, в котором они содержались в исходной воде, например, если в исходной воде жесткость кальциевая составляла 70%, то и доля кальция в удаляемых из фильтра продуктах регенерации будет $\alpha_{Ca} = 0,7$.

Количество CaCl_2 , удаляемого за одну регенерацию фильтра, определяют по уравнению

$$[\text{CaCl}_2] = \mathcal{K}_p \alpha_{Ca} = \mathcal{K}_p \frac{\mathcal{K}_{Ca}}{\mathcal{K}_0}, \text{ кг-экв} \quad (21)$$

где \mathcal{K}_{Ca} – кальциевая жесткость исходной воды, мг-экв/л.

Количество MgCl_2 , сбрасываемого за одну регенерацию фильтра, определяют по формуле

$$[\text{MgCl}_2] = \mathcal{K}_p \alpha_{Mg} = \mathcal{K}_p \frac{\mathcal{K}_{Mg}}{\mathcal{K}_0}, \text{ кг-экв} \quad (22)$$

где \mathcal{K}_{Mg} – магниевая жесткость исходной воды, мг-экв/л.

Количество CaCl_2 и MgCl_2 , сбрасываемое в течение суток, определяют по уравнениям

$$[\text{CaCl}_2]_{\text{сут.}} = \frac{55,5[\text{CaCl}_2](a-1)n}{1000}, \text{ т/сут.} \quad (23)$$

$$[\text{MgCl}_2]_{\text{сут.}} = \frac{47,6[\text{MgCl}_2](a-1)n}{1000}, \text{ т/сут.} \quad (24)$$

где 55,5 и 47,6 г – эквивалентная масса соответственно CaCl_2 и MgCl_2 .

Сброс продуктов регенерации от Na-катионитных фильтров второй ступени отдельно не рассчитывают, так как регенерацию этих фильтров производят 1 раз в 10–15 сут. и значительно раньше истощения катионита, что не сказывается на расчете, поэтому все сбросы принимают по первой ступени Na-катионирования.

Избыток соли, сбрасываемый в канализацию от одной регенерации фильтра, определяют по уравнению

$$[\text{NaCl}] = (q_c - 58,44)F_{\phi}H_{\text{сл}}E_p^{\text{Na}}, \text{ кг} \quad (25)$$

где 58,4 – теоретический удельный расход соли на регенерацию, г/г-экв.

Количество поваренной соли, сбрасываемой в канализацию в течение суток

$$[\text{NaCl}]_{\text{сут.}} = \frac{[\text{NaCl}](a-1)n}{1000}, \text{ т/сут.} \quad (26)$$

Сброс измельченного катионита в течение суток незначителен, годовой износ катионита находят по уравнению

$$I_{\kappa} = \frac{\gamma_{\kappa}F_{\phi}H_{\text{сл}}(a-1)b}{100}, \text{ т/год} \quad (27)$$

где γ_k – насыпная масса катионита, т/м³; принимают по таблице 7 для катионита, используемого в фильтре;

b – механический годовой износ катионита, %; принимают по таблице 7 для катионита, используемого в фильтре.

Расчет механических фильтров производят в следующем порядке:

1. Определяют расчетную суммарную площадь фильтрования по уравнению (1).

2. Принимают общее количество устанавливаемых фильтров.

3. Определяют расчетную площадь одного фильтра по уравнению (2).

4. Принимают фактическое значение диаметра и площади фильтрования одного фильтра по таблице 3 (принимают ближайшее к расчетному значение площади фильтрования стандартного фильтра).

5. Определяют по таблице 5 удельный расход NaCl на регенерацию фильтра и по таблице 4 – значение коэффициента эффективности регенерации катионита.

6. Определяют отношение концентрации ионов Na⁺ в исходной воде к ее жесткости и по таблице 6 – значение коэффициента снижения обменной емкости катионита.

7. Определяют рабочую обменную емкость катионита при Na-катионировании по уравнению (4).

8. Определяют высоту слоя катионита по уравнению (3).

9. Проверяют условие $1,5\text{ м} \leq H_{\text{сл}} \leq 2,5\text{ м}$. Если условие не выполняется изменяют диаметр фильтров или их число и расчеты повторяют вновь.

10. Определяют расходы на регенерацию катионита 100% хлористого натрия по уравнению (5) и технической поваренной соли по уравнению (6).

11. Определяют расход воды на одну взрыхляющую промывку по уравнению (7), расход воды на приготовление регенерационного раствора соли по уравнению (8), расход воды на промывку катионита от продуктов реакции по уравнению (9).

12. Определяют расход воды на одну регенерацию фильтра по уравнению (10) и среднечасовой расход воды на собственные нужды по уравнению (11).

13. Определяют фактическое значение скорости фильтрования при нормальных условиях работы по уравнению (12) и фактическое значение скорости фильтрования при форсированном режиме работы по уравнению (13).

14. Определяют время пропуска регенерационного раствора через фильтр по уравнению (16) и время отмывки фильтра от продуктов регенерации по уравнению (17).

15. Определяют время регенерации фильтра по уравнению (15).

16. Определяют время между регенерациями фильтра по уравнению (14) и количество одновременно регенерируемых фильтров по уравнению (18).

17. Производят расчет сточных вод от катионитовых фильтров по уравнениям (19)–(26).

18. Определяют годовой износ катионита по уравнению (27).

3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТОВ

Исходные данные для различных вариантов расчета ионообменного фильтра приведены в таблице 7. Данные, общие для всех вариантов расчетов, приведены в таблице 8.

Таблица 7

Исходные данные для расчетов

№ вари- анта	Расход воды, Q_0 , м ³ /ч	Состав воды				Коли- чество филь- тров a	Число регене- раций фильтра в сутки n
		жест- кость, J_0 , мг-экв/л	концентрация				
			ионов кальция J_{Ca} , мг- экв/л	ионов магния, J_{Mg} , мг-экв/л	ионов натрия C_{Na} , мг/л		
1	30	1,6	1,17	0,43	12,4	3	2
2	60	1,6	1,17	0,43	12,4	3	2
3	100	1,6	1,17	0,43	12,4	4	2
4	150	1,6	1,17	0,43	12,4	5	2
5	200	1,6	1,17	0,43	12,4	4	2
6	30	4,5	3,5	1,0	35,0	4	3
7	60	4,5	3,5	1,0	35,0	4	3
8	100	4,5	3,5	1,0	35,0	5	3
9	150	4,5	3,5	1,0	35,0	4	3
10	200	4,5	3,5	1,0	35,0	4	3

№ вари- ри- анта	Расход воды, Q_0 , м ³ /ч	Состав воды				Коли- чество филь- тров a	Число регене- раций фильтра в сутки n
		жест- кость, J_0 , мг-экв/л	концентрация				
			ионов кальция J_{Ca} , мг- экв/л	ионов магния, J_{Mg} , мг-экв/л	ионов натрия C_{Na} , мг/л		
11	30	7	5,0	2,0	55,0	5	3
12	60	7	5,0	2,0	55,0	5	3
13	100	7	5,0	2,0	55,0	5	3
14	150	7	5,0	2,0	55,0	4	3
15	200	7	5,0	2,0	55,0	5	3
16	30	10	7,0	3,0	75,0	4	3
17	60	10	7,0	3,0	75,0	4	3
18	100	10	7,0	3,0	75,0	5	3
19	150	10	7,0	3,0	75,0	5	3
20	200	10	7,0	3,0	75,0	5	3
21	30	15	11,0	4,0	115,0	5	3
22	60	15	11,0	4,0	115,0	5	3
23	100	15	11,0	4,0	115,0	5	3
24	150	15	11,0	4,0	115,0	5	3
25	200	15	11,0	4,0	115,0	5	3

Таблица 8

Технологические данные для расчета Na-катионитных фильтров

Показатель	Обозна- чение	Сульфо- уголь	Катионит Ку-2
Высота слоя катионита, м	$H_{сл}$	1,5–2,0	1,5
Крупность зерен катионита, мм		0,5–1,2	0,5–1,2
Насыпная масса катионита, т/м ³ ;	γ_k	0,68	0,79
Механический годовой износ катиони- та, %, Скорость фильтрования, м/ч, нормаль- ная не должна превышать при жестко- сти воды:	b	15	10
0–5 мг-экв/л	ω_n	25	25
5–10 мг-экв/л		15	15
10–15 мг-экв/л		10	10

Показатель	Обозначение	Сульфуголь	Катионит Ку-2
Максимально допустимая скорость, м/ч, (при выключении одного фильтра на регенерацию) не должна превышать при жесткости воды: 0–5 мг-экв/л 5 –10 мг-экв/л 10–15 мг-экв/л	ω_m	35 25 20	35 25 20
Взрыхляющая промывка катионита: - интенсивность, л/м ² ·с - продолжительность, мин	i $t_{взр}$	5 25	5 25
Число регенераций каждого Накатионитного фильтра первой ступени в сутки	n	1-3	1-3
Концентрация регенерационного раствора, %	$b_{p.p}$	6,5	6,5
Плотность регенерационного раствора, т/м ³	$\rho_{p.p}$	1,045	1,045
Скорость пропуска регенерационного раствора, м/ч	$\omega_{p.p}$	3,5	3,5
Содержание NaCl в технической соли, %	p	90	90
Отмывка катионита от продуктов регенерации: - удельный расход отмывочной воды, м ³ на 1 м ³ катионита; - скорость пропуска отмывочной воды через катионит, м/ч	$q_{уд}$ $\omega_{отм}$	5 7	6 7

4. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Результаты практической работы оформить в виде отчета, в котором должны быть изложены:

- наименование и вариант работы;
- исходные данные для расчетов;
- методика расчетов с результатами вычислений;
- таблица, отражающая результаты расчетов (таблица 9).

Таблица 9

Результаты расчетов фильтров Na-катионитового умягчения воды

Наименование показателей	Обозначение	Значение
1. Количество умягченной воды, получаемой после Na-катионитовых фильтров, м ³ /ч	Q	
2. Количество воды, израсходованной на собственные нужды, м ³ /ч	$Q_{с.н}$	
3. Количество ионообменных фильтров, включая резервный	a	
4. Диаметр ионообменных фильтров, мм	d_{ϕ}	
5. Скорость фильтрования при нормальном режиме работы фильтров, м/ч	ω_{ϕ}	
6. Число регенераций ионообменных фильтров в сутки	n	
7. Количество технической соли, расходуемой в сутки на регенерацию, кг/сут.	$Q_{т.с}$	
8. Количество сточных вод, сбрасываемое от Na-катионитных фильтров, м ³ /сут.	$Q_{сут}^{Na}$	
9. Количество CaCl ₂ , сбрасываемое в канализацию, т/сут.	$[CaCl_2]_{сут}$	
10. Количество MgCl ₂ , сбрасываемое в канализацию, т/сут.	$[MgCl_2]_{сут}$	
11. Количество поваренной соли, сбрасываемой в канализацию, т/сут.	$[NaCl]_{сут}$	
12. Годовой износ катионита, т/год	I_K	

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. На чем основан процесс ионного обмена?
2. Какие ионообменные материалы называются катионитами?
3. Какие ионообменные материалы называются анионитами?
4. Для чего проводят регенерацию ионообменных смол?
5. Какие катиониты используют в установках водоподготовки энергетических объектов?
6. В чем заключается умягчение воды методом ионного обмена?
7. Напишите реакции, протекающие при ионообменном умягчении воды?
8. Для чего применяют двухступенчатое умягчение воды?
9. Жесткость воды, достигаемая после первой и после второй ступеней ионообменного умягчения?

10. На каких стадиях работы ионообменного фильтра образуются сточные воды?

11. Какие загрязнители сбрасываются со сточными водами установок ионообменного умягчения воды?

Практическая работа 4

РАСЧЕТ ПРОЦЕССА УДАЛЕНИЯ ИЗ ВОДЫ РАСТВОРЕННОГО ДИОКСИДА УГЛЕРОДА В ДЕКАРБЕНИЗАТОРЕ

Работа предназначена для ознакомления студентов с теоретическими положениями и методами расчетов установок подготовки воды для котельных и тепловых электростанций.

Для вод, используемых для энергетических целей, имеют важное значение растворенные в воде газы и прежде всего растворенный диоксид углерода (CO_2), т. к. требованиями к качеству питательной воды для котлов и водоподогревателей лимитируется его содержание в воде. Поэтому в схемах водоподготовительных установок предприятий теплоэнергетики воду после Na- или H- катионирования подвергают декарбонизации, т. е. очистке от растворенного CO_2 .

Студенты по нижеприведенной методике определяют основные параметры процесса декарбонизации и основные размеры декарбонизатора для его проведения.

1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Удаление из воды растворенных газов – важная часть комплексного технологического процесса обработки воды, реализуемого на предприятиях тепловой энергетики. Необходимость этого процесса вызвана стремлением уменьшить интенсивность коррозии внутренних поверхностей теплосилового оборудования под действием растворенных в теплоносителе агрессивных газов. Кроме того, наличие в воде растворенного диоксида углерода отрицательно сказывается на эффективности работы анионитных фильтров, установленных в схеме очистки добавочной воды.

Один из основных потоков, подвергаемых дегазации, – питательная вода котлов. Однако растворенные газы удаляют и из пото-

ков, не являющихся непосредственно рабочим телом. Такими потоками являются химически очищенная вода, подпиточная вода тепловых сетей, конденсат пара, возвращаемый в тепловой цикл станции от внешних потребителей, охлаждающая вода конденсаторов турбин.

Кислород O_2 и диоксид углерода CO_2 присутствуют в воде в результате растворения при контакте воды с атмосферным воздухом. Диоксид углерода появляется в воде также в процессе химического обессоливания после стадии Н-катионирования и при умягчении воды методами Na-Н-катионирования. Азот – инертный газ, его наличие в воде обусловлено контактом воды с атмосферным воздухом, появление водорода H_2 в воде – коррозией внутренних поверхностей теплосилового оборудования. Аммиак NH_3 попадает в воду главным образом в результате аминирования питательной воды и, кроме того, присутствует в химически очищенной воде, если в схеме подготовки воды установлены NH_4 -катионитовые фильтры. Такие газы, как сернистый ангидрид SO_2 и сероводород H_2S , могут присутствовать в теплоносителе при использовании на станции котлов среднего давления и обработке питательной воды сульфитом натрия.

Наиболее эффективный способ удаления растворенных газов из воды – десорбция. Этот способ основан на известных законах Генри–Дальтона, характеризующих зависимость между концентрацией в воде растворенного газа и его парциальным давлением.

Применение этих законов дает возможность определить концентрацию газа при том условии, что в паровом пространстве над водой находится лишь рассматриваемый газ и отсутствуют другие газы. Концентрация растворенного в воде газа выражается уравнением

$$C_z = K_z p_z = K_z (p_{общ} - p_{H_2O}) \quad (1)$$

где C_z – концентрация растворенного в воде газа;

K_z – коэффициент абсорбции газа водой;

$p_{общ}$ – общее давление;

p_{H_2O} – парциальное давление водяного пара;

p_2 – парциальное давление газа.

Как видно из уравнения (1), понижение концентрации газа в воде происходит с уменьшением разности $(p_{общ} - p_{H_2O})$, т. е. в случае приближения парциального давления водяных паров к значению полного давления газовой смеси. Это достигается созданием над поверхностью воды, содержащей рассматриваемый газ, смеси газов, в составе которой практически отсутствует удаляемый из воды газ. Таким образом, для удаления газа из воды необходимо создать условия, при которых парциальное давление его над поверхностью воды было бы равно нулю.

Удаление газа из воды существенно зависит от кинетики десорбции, которая может быть выражена уравнением

$$-dC_2 / d\tau = (C_2 - C_2^P)kf, \quad (2)$$

где $dC_2 / d\tau$ – скорость десорбции;

C_2 – концентрация удаляемого газа;

C_2^P – равновесная концентрация газа;

K – коэффициент пропорциональности;

f – удельная поверхность раздела фаз.

Наибольший эффект достигается при $C_2^P = 0$, т. е. при парциальном давлении удаляемого газа, близком к нулю. В этом случае уравнение (2) преобразуется к виду

$$-dC_2 / \tau = C_2kf. \quad (3)$$

При постоянных k и f для данного аппарата концентрация газа в воде зависит только от времени дегазации, с увеличением времени дегазации концентрация растворенного газа в воде уменьшается. Полного освобождения воды от растворенного газа в какой-либо реальный отрезок времени достичь невозможно, поэтому время, необходимое для дегазации, находят, задаваясь определенной конечной концентрацией растворенного в воде газа.

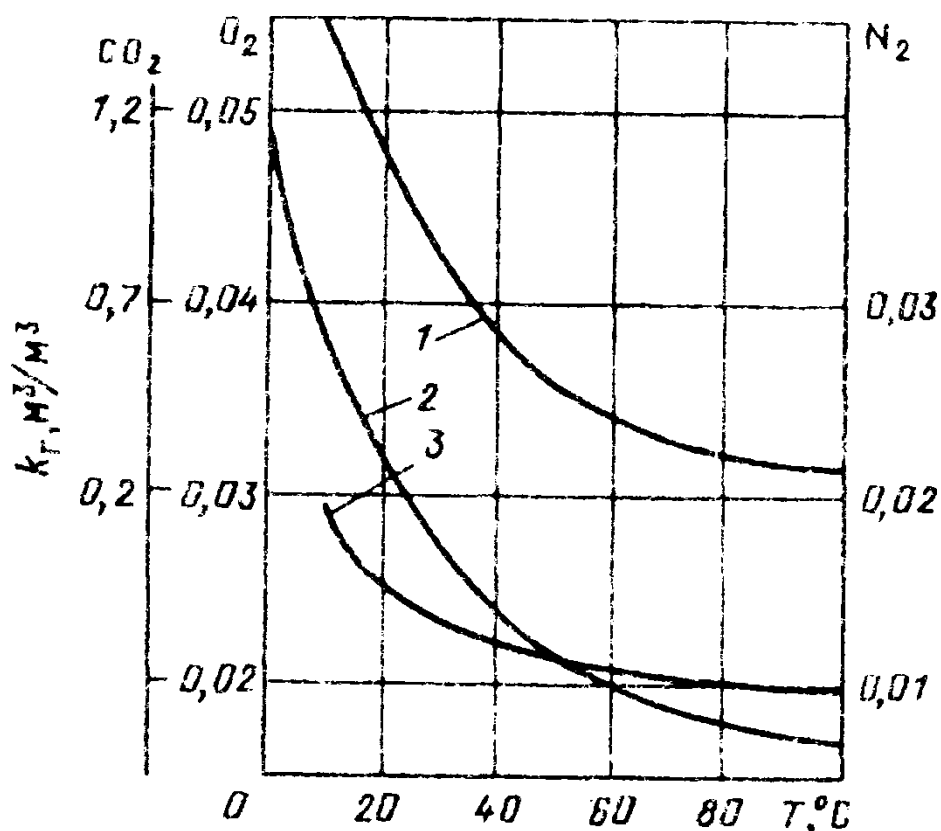
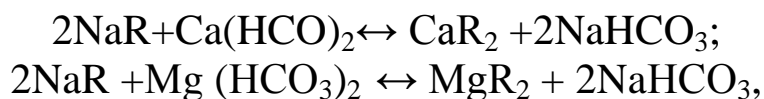


Рис. 1. Коэффициенты абсорбции CO_2 (1), N_2 (2) и O_2 (3) водой

Эффект дегазации можно повысить, увеличив удельную поверхность раздела фаз пара и воды. В этом случае при прочих равных условиях увеличивается время контакта воды с паром, не содержащим удаляемый из воды газ. На эффект дегазации существенно влияет повышение температуры воды, это обусловлено тем, что с повышением температуры уменьшается коэффициент абсорбции газа водой. На рисунке 1 показана зависимость коэффициента абсорбции от температуры для кислорода, диоксида углерода и азота.

Удаление растворенного диоксида углерода

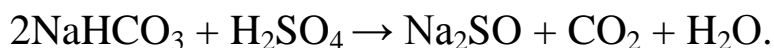
При умягчении воды Na-катионированием присутствующие в воде бикарбонаты кальция и магния переходят в бикарбонат натрия:



который при последующем нагревании воды в котлах подвергается термическому разложению с образованием диоксида углерода

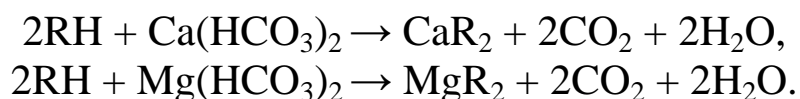


Образующийся диоксид углерода повышает коррозионную активность воды и увеличивает коррозию внутренних поверхностей труб котлов и другого водогрейного оборудования. Поэтому воду перед декарбонизацией воду сначала подкисляют серной кислотой и разлагают бикарбонат натрия с образованием сульфата натрия, диоксида углерода и воды:



Затем из подкисленной воды удаляют растворенный диоксид углерода.

Много CO_2 образуется в схемах с Н-катионированием воды, которое протекает по реакции



Снижение концентрации CO_2 в воде можно достичь аэрацией, т. е. продувкой воды воздухом. Этот способ удаления из воды растворенного диоксида углерода широко применяют на водоподготовительных установках различных предприятий тепловой энергетики. Сущность метода аэрации заключается в продувании через воду воздуха, содержащего незначительное количество CO_2 . В результате над поверхностью обрабатываемой воды создается атмосфера, в которой парциальное давление диоксида углерода ничтожно мало по сравнению с парциальным давлением CO_2 в воде.

Удаление из воды диоксида углерода производят в аппаратах, называемых *декарбонизаторами*, а сам процесс носит название *декарбонизации*. Декарбонизацию проводят в аппаратах как пленочного, так и барботажного типа. Принципиальная схема декарбонизатора пленочного типа представлена на рисунке 2. Декарбонизатор представляет собой цилиндрический стальной бак 7, внутри которого располагается насадка 2, состоящая из деревянных досок, уложенных в шахматном порядке с зазором, или из колец Рашига, представляющих собой керамические кольца. Вода подается в декарбонизатор сверху через патрубок 4. Со щита 6 она сливается че-

рез распределительные сопла 5 на поверхность насадки. Обрабатываемая вода омывает элементы насадки тонким слоем, а навстречу ей движется воздух, подаваемый в декарбонизатор вентилятором через патрубок 7. Удаляемый из воды CO_2 переходит в воздух и вместе с ним выводится из декарбонизатора в атмосферу через патрубок 3. Прошедшая очистку вода стекает в поддон декарбонизатора и через гидравлический затвор по патрубку 8 поступает в бак декарбонизованной воды, который располагается под днищем декарбонизатора.

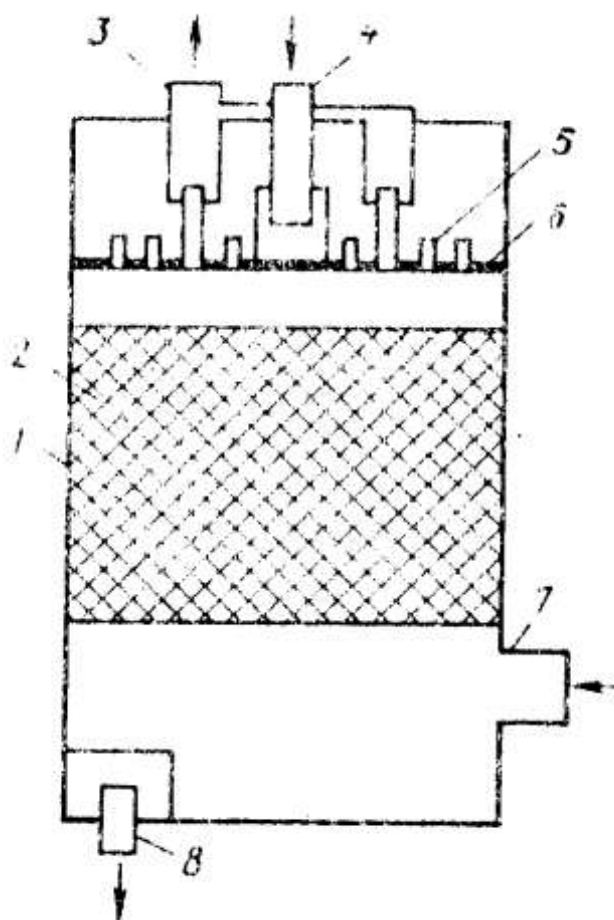


Рис. 2. Принципиальная схема декарбонизатора

При правильно выбранной площади поверхности контакта воды с воздухом и достаточном расходе воздуха использование декарбонизатора пленочного типа позволяет снизить концентрацию растворенного CO_2 в декарбонизованной воде до 3–7 мг/кг.

Конструкция барботажного декарбонизатора предусматривает продувку сжатого воздуха снизу через всю площадь сечения бака, в который сверху поступает обрабатываемая вода. Для этих аппара-

тов требуется более высокое давление воздуха, подаваемого компрессором, чем для декарбонизаторов пленочного типа. Кроме того, необходимо предусматривать очистку воздуха от смазочного масла компрессора.

В практике обработки воды получили широкое применение декарбонизаторы с насадкой из колец Рашига. Характеристика колец Рашига приведена в таблице 1.

Таблица 1

Характеристика колец Рашига

Размеры колец, мм	Количество колец в 1 м ³ насадки при беспорядочной загрузке	Поверхность насадки, м ² /м ³	Масса колец, кг/м ³
25×25×3	53200	204	532
35×35×4	20200	140	505
50×50×5	6000	87,5	530

2. МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Расчет декарбонизатора состоит в определении геометрических размеров необходимой поверхности колец Рашига и определении напора, создаваемого вентилятором. Площадь поперечного сечения декарбонизатора определяют по плотности орошения насадки, т. е. по расходу воды, приходящемуся на единицу площади поперечного сечения декарбонизатора.

На основании расчета необходимо произвести выбор декарбонизатора из выпускаемых промышленностью, при этом необходимо обеспечить 25%-й запас производительности по воде против расчетного.

Размер колец Рашига независимо от производительности декарбонизатора составляет 25×25×3 мм. Поверхность единицы объема колец Рашига равна 204 м²/м³, а масса 532 кг/м³. Количество колец в 1 м³ при беспорядочной загрузке 53200 шт./м³, свободный объем на 1 м³ насадки составляет 0,74 м³/м³.

Содержание диоксида углерода в исходной воде определяется по номограмме, приведенной на рисунке 3.

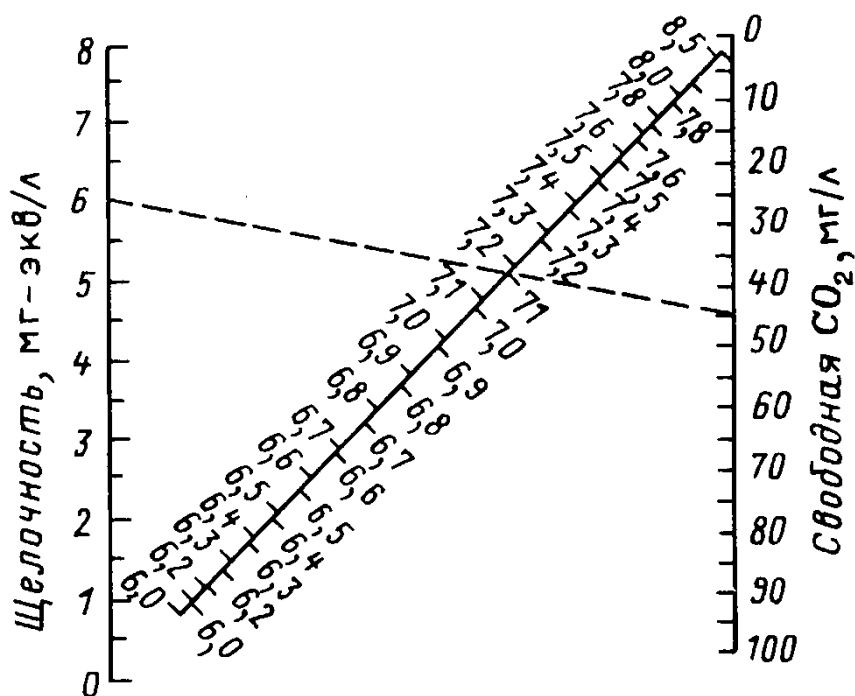


Рис. 3. Номограмма для определения содержания в воде диоксида углерода в зависимости от значения pH и щелочности воды

Номограмма составлена для воды с сухим остатком 200 мг/л при температуре 10 и 20°C. При других значениях сухого остатка вводится поправочный коэффициент, значения которого приведены в таблице 2.

Таблица 2

Значения поправочного коэффициента

Сухой остаток $C_{с.о}$, мг/л	100	200	300	400	500	750	1000
Поправочный коэффициент α	1,05	1,0	0,96	0,94	0,92	0,87	0,83

Содержание диоксида углерода в исходной воде $[CO_2]_{и.в}$ определяют из уравнения

$$[CO_2]_{и.в} = [CO_2]_{и} \alpha, \text{ мг/л} \quad (4)$$

где $[CO_2]_{и}$ – содержание диоксида углерода, мг/л; по номограмме (рис. 3);

α – поправочный коэффициент, соответствующий сухому остатку исходной воды (таблица 2).

Количество диоксида углерода, поступающее в декарбонизатор после Na-катионирования и подкисления (или после H-катионирования) воды, определяют из уравнения

$$C_{вх} = (44 J_K + [CO_2]_{и.в.}), \text{ мг/л} \quad (5)$$

где J_K – карбонатная жесткость, разрушаемая при Na-катионировании и подкислении или при H-катионировании воды, мг-экв/л.

Необходимую поверхность насадки F (поверхность десорбции) (m^2), обеспечивающую удаление растворенного диоксида углерода, определяют из уравнения

$$F = \frac{G}{K_{ж} \Delta C_{ср}}, \quad (6)$$

где G – количество CO_2 , удаляемое в декарбонизаторе, кг/ч, находят из уравнения

$$G = Q(C_{вх} - C_{вых}), \quad (7)$$

где Q – производительность декарбонизатора, $m^3/ч$;

$C_{вых}$ – концентрация CO_2 в декарбонизированной воде, принимают равной $0,005 \text{ кг/м}^3$ (5 мг/л);

$K_{ж}$ – коэффициент десорбции диоксида углерода, $m/ч$; для декарбонизаторов с кольцами Рашига $25 \times 25 \times 3 \text{ мм}$ и плотностью орошения $60 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, определяют в зависимости от температуры декарбонизированной воды по графику на рисунке 4;

$\Delta C_{ср}$ – средняя движущая сила десорбции, кг/м^3 , определяют по рисунку 5 в зависимости от содержания растворенного диоксида углерода до и после декарбонизатора.

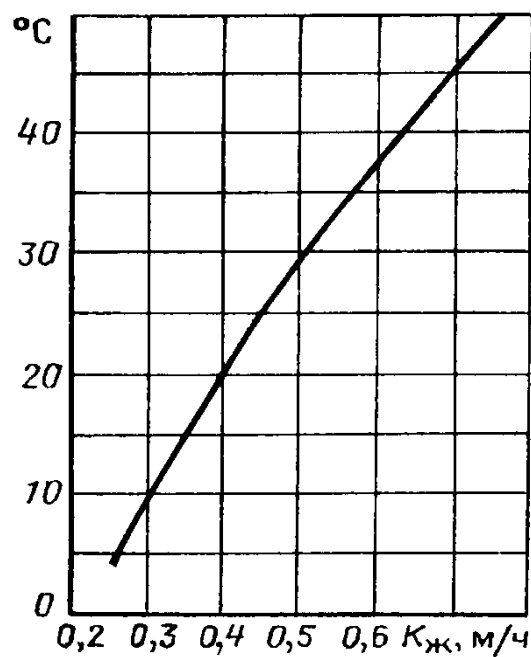


Рис. 4. Зависимость $K_{ж}$ от температуры для декарбонизаторов, загруженных кольцами Рашига размером 23×25×3 мм, при плотности орошения $60 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$

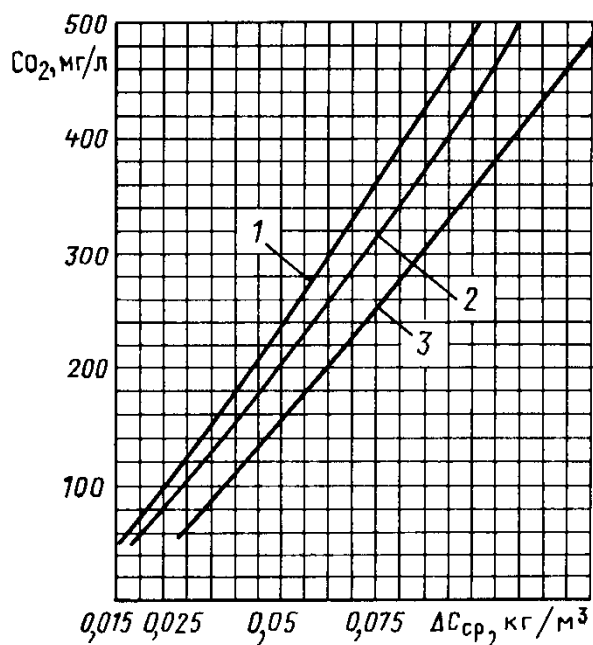


Рис. 5. Зависимость ΔC_{cp} от $C_{вых}$ при различных значениях $C_{вых}$ (мг/л): 1 – 3; 2 – 5; 3 – 10

Площадь поперечного сечения декарбонизатора f определяют из уравнения

$$f = \frac{Q}{60}, \text{ м}^2 \quad (8)$$

где 60 – оптимальная плотность орошения насадки, $\text{м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$, на единицу площади поперечного сечения декарбонизатора.

При снижении плотности орошения насадки с 60 до $40 \text{ м}^3 / (\text{м}^2 \cdot \text{ч})$ возникает необходимость увеличения площади декарбонизатора на 50%, объема насадки на 58% и высоты насадки на 5%.

Диаметр декарбонизатора определяют из уравнения

$$D = \sqrt{\frac{4f}{3,14}}, \text{ м.} \quad (9)$$

Высота насадки в декарбонизаторе

$$h = \frac{V_{к.р}}{f}. \quad (10)$$

Здесь $V_{к.р}$ – объем, занимаемый кольцами Рашига $25 \times 25 \times 3$ мм при беспорядочной загрузке, определяют из уравнения

$$V_{к.р} = \frac{F}{204}, \quad (11)$$

где F – поверхность десорбции, м^2 ;
 204 – поверхность 1 м^3 насадки при беспорядочной загрузке, $\text{м}^2 / \text{м}^3$.
 Расход воздуха, подаваемого в декарбонизатор ($\text{м}^3 / \text{ч}$):

$$Q_{воз} = bQ, \quad (12)$$

где b – удельный расход воздуха, $\text{м}^3 / \text{м}^3$.

Суммарное сопротивление проходу воздуха через декарбонизатор (мм вод. ст.):

$$\Sigma \zeta = 40 + 25h, \quad (13)$$

где 25 мм вод. ст. – сопротивление высоты слоя в 1 м насадки из колец Рашига 25×25×3.

3. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТОВ

Данные, общие для всех вариантов расчетов, приведены в таблице 3. Исходные данные для различных вариантов расчета декарбонизатора приведены в таблице 4.

Таблица 3

Технологические данные для расчета декарбонизатора

Параметр	Обозначение	Значение
Концентрация растворенного диоксида углерода в декарбонизированной воде, мг/л	$C_{вых}$	5,0
Температура воды в декарбонизаторе, °С	t	20
Удельный расход воздуха, подаваемого в декарбонизатор, м ³ /м ³	b	25

4. ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ

Результаты практической работы оформить в виде отчета, в котором должны быть изложены:

- наименование и вариант работы;
- исходные данные для расчетов;
- методика расчетов с результатами вычислений;
- таблица, отражающая результаты расчетов (таблице 5).

Таблица 4

Исходные данные для расчетов

№ варианта	Производительность, декарбонизатора Q , м ³ /ч	Состав исходной воды			
		карбонатная жесткость, разрушаемая при умягчении $Ж_0$, мг-экв/л	рН	щелочность, мг-экв/л	сухой остаток $C_{с.о}$, мг/л
1	30	1,0	6,5	1,5	100
2	60	1,0	6,5	1,5	100
3	100	1,0	6,5	1,5	100
4	150	1,0	6,5	1,5	100
5	200	1,0	6,5	1,5	100
6	30	3,0	7,0	4,0	200
7	60	3,0	7,0	4,0	200
8	100	3,0	7,0	4,0	200
9	150	3,0	7,0	4,0	200
10	200	3,0	7,0	4,0	200
11	30	5,0	7,5	6,0	500
12	60	5,0	7,5	6,0	500
13	100	5,0	7,5	6,0	500
14	150	5,0	7,5	6,0	500
15	200	5,0	7,5	6,0	500
16	30	7,0	8,0	8,0	750
17	60	7,0	8,0	8,0	750
18	100	7,0	8,0	8,0	750
19	150	7,0	8,0	8,0	750
20	200	7,0	8,0	8,0	750
21	30	10,0	8,5	12	1000
22	60	10,0	8,5	12	1000
23	100	10,0	8,5	12	1000
24	150	10,0	8,5	12	1000
25	200	10,0	8,5	12	1000

Таблица 5

Результаты расчетов

Наименование показателей	Обозначение	Значение
1. Производительность декарбонизатора, м ³ /ч	Q	
2. Количество растворенного диоксида углерода в воде, поступающей в декарбонизатор, мг/л	$C_{вх}$	
3. Количество свободного диоксида углерода в декарбонизированной воде, мг/л	$C_{вых}$	
4. Диаметр декарбонизатора, м	D	
5. Высота насадки в декарбонизаторе, м	h	
6. Расход воздуха, подаваемого в декарбонизатор, м ³ /ч	$Q_{воз}$	
7. Суммарное сопротивление проходу воздуха через декарбонизатор, мм вод. ст.	$\Delta\zeta$	

5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Чем обусловлена необходимость удаления газов из воды в установках водоподготовки?

2. Какие растворенные газы присутствуют в питательной воде котлов?

3. На чем основан метод удаления газов из воды десорбцией?

4. Какие факторы влияют на процесс десорбции газов из воды?

5. Как образуется растворенный диоксид углерода CO_2 в умягченной воде, подвергнутой Na- или H-катионированию?

6. Какой процесс называется декарбонизацией, его сущность?

7. Как устроен и как работает декарбонизатор?

8. Для чего применяется насадка в декарбонизаторе?

9. Из каких материалов изготавливают насадку в декарбонизаторе?

2. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА

ДЗ 1: Подготовка к защите практической работы 1.

ДЗ 2: Подготовка к опросу 1.

Примерные вопросы:

1. Процессы накипеобразования и коррозии и их влияние на работу котельного и водогрейного оборудования.
2. Схема образования и гидролиза карбонатных ионов.
3. Агрессивная, стабильная и нестабильная вода. Индекс стабильности Лонжелье.
4. Виды накипи и причины, обуславливающие их возникновение в трубах котлов.
5. Требования к качеству питательной воды водогрейных и паровых котлами различных типов.

ДЗ 3: Подготовка к защите практической работы 2.

ДЗ 4: Подготовка к опросу 2.

Примерные вопросы:

1. Грубодисперсные и коллоидные примеси в воде и способы их удаления.
2. Коагуляция коллоидных примесей, физико-химические основы метода, коагулянты, применяемые в практике водоподготовки
3. Интенсификация процессов очистки воды от коллоидных примесей путем совместной обработки воды коагулянтом и флокулянтом.
4. Оборудование для очистки воды фильтрованием.
5. Фильтрующие материалы, их характеристика.
6. Работа фильтров, фильтроцикл.
7. Промывные растворы, их состав и утилизация.

ДЗ 5: Подготовка к защите практической работы 3.

ДЗ 6: Подготовка к опросу 3.

Примерные вопросы:

1. Методы умягчения воды, их применение в практике водоподготовки на предприятиях теплоэнергетики.

2. Химизм и физико-химические основы ионообменного умягчения и обессоливания воды.

3. Ионообменные материалы, их свойства, учитываемых при подготовке воды.

4. Na-катионирование воды, схемы Na-катионирования.

5. Оборудование для ионного умягчения воды.

6. Сточные воды, образующиеся в процессе регенерации ионообменных фильтров, способы их очистки и утилизации.

7. Удаление из воды свободной углекислоты.

8. Теоретически основы процесса удаления из воды растворенных газов.

9. Устройство декарбонизатора его расчет.

10. Удаление из воды растворенного кислорода.

11. Физико-химические основы метода.

12. Термический и вакуумный методы деаэрации, и устройство деаэраторов.

ДЗ 7: Подготовка к защите практической работы 4.

ДЗ 8: Подготовка к опросу 4.

Примерные вопросы:

1.Осадки, образующиеся на стадии коагуляции воды, их состав.

2. Экологический ущерб, наносимый осадками ОС.

3. Обезвоживание осадков и их утилизация.

4. Жидкие отходы, образующиеся на стадиях ионообменного умягчения и обессоливания воды, их состав.

5. Экологический ущерб, наносимый окружающей среде.

6. Переработка и утилизация отходов умягчения воды.

Подготовка к зачету.

Вопросы к зачету:

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?

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?
16. На какие виды подразделяется примеси воды в зависимости от размеров их частиц?
17. В чем сущность процесса коагуляции примесей воды?
18. Как протекает процесс коагуляции коллоидных примесей?
19. Какие реагенты применяются в качестве коагулянтов в практике водоподготовки теплоэнергетических установок?
20. Напишите реакции, которые протекают при добавлении к воде сульфата алюминия?
21. Как работают осветлители со слоем взвешенного осадка?
22. Для чего создается взвешенный слой в осветлителях?
23. Какие параметры обеспечивают стабильность работы осветлителя?
24. Для чего применяется метод очистки воды фильтрованием?
25. В чем заключается сущность метода фильтрования?
26. Как классифицируются фильтры для механической очистки воды?
27. Какие материалы применяют для очистки воды фильтрованием?
28. Какие показатели определяют эффективность очистки воды методом фильтрования?
29. Для чего применяют промывку фильтрующего механического фильтра?

30. Как осуществляют промывку фильтрующего слоя механического фильтра?

31. Для чего применяют сжатый воздух при промывке фильтрующего слоя механического фильтра?

32. Что называют фильтроциклом в процессе работы механического фильтра?

33. Какие фильтры применяются на ВПУ в теплоэнергетике и их внутреннее устройство?

34. Для чего применяется метод умягчения воды.

35. Какие существуют методы умягчения воды?

36. В чем заключается умягчение воды методом ионного обмена?

37. Напишите реакции, протекающие при ионообменном умягчении воды?

38. Какие вещества называются ионообменными материалами, их свойства?

39. Какие ионообменные материалы называются катионитами?

40. Какие ионообменные материалы называются анионитами?

41. Какие ионообменные материалы используют для умягчения воды в установках водоподготовки энергетических объектов?

42. Какие свойства ионообменных материалов отражает показатель сорбционная емкость, виды сорбционной емкости.

43. Для чего проводят регенерацию ионообменных смол?

44. Напишите реакции, протекающие при регенерации ионообменных фильтров.

45. Этапы, входящие в суммарный процесс регенерации ионообменного фильтра?

46. Последовательность выполнения этапов, связанных с регенерацией ионообменного фильтра?

47. На каких стадиях регенерации ионообменного фильтра образуются сточные воды?

48. Какие загрязнители содержатся в сточных водах установок ионообменного умягчения воды?

49. Чем обусловлена необходимость удаления газов из воды в установках водоподготовки?

50. Какие растворенные газы присутствуют в питательной воде котлов?

51. На чем основан метод удаления газов из воды десорбцией?

52. Какие факторы влияют на процесс десорбции газов из воды?
53. Как образуется свободная CO_2 в умягченной воде, подвергнутой Na -катионированию?
54. Какой процесс называется декарбонизацией, его сущность?
55. Как устроен и как работает декарбонизатор?
56. Для чего применяется насадка в декарбонизаторе?
57. Виды насадок, устанавливаемых в декарбонизаторах?
58. Какое требование должно выполняться для удаления из воды растворенного кислорода?
59. Каким образом достигается удаление из воды растворенного кислорода.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фрог, Б. Н. Водоподготовка [Электронный ресурс]: учебник для студентов вузов, обучающихся по программе бакалавриата, направление 270800 Строительство, профиль Водоснабжение и водоотведение / Б. Н. Фрог, А. Г. Первов. – Москва: АСВ, 2015. – 512 с. – Режим доступа: <http://www.studentlibrary.ru/book/ISBN9785930939743.html>. – Загл. с экрана.
2. Копылов, А. С. Водоподготовка в энергетике [Текст]: учебное пособие для вузов по специальностям «Тепловые электрические станции» и «Технология воды и топлива на тепловых и атомных электрических станциях» направления подготовки дипломируемых специалистов «Теплоэнергетика» / А. С. Копылов, В. М. Лавыгин, В. Ф. Очков. – Москва: Издательство МЭИ, 2003. – 310 с.
3. Водоподготовка [Электронный ресурс]. – Москва: Издательский Дом «Аква-Терм», 2007. – 241 с. – Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=97864. – Загл. с экрана.
4. Стекольников, Ю. А. Водоподготовка в пищевой промышленности [Электронный ресурс]. – Елец: Елецкий государственный университет им. И. А. Бунина, 2008. – 102 с. – Режим доступа: http://biblioclub.ru/index.php?page=book_red&id=364556. – Загл. с экрана.