

Министерство образования Республики Беларусь

Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»

Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и экология»

**Н. В. Овсянник, Е. Н. Волкова, Д. С. Трошев**

## **ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНЫЙ РЕЖИМ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК**

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ  
по одноименному курсу для студентов  
специальностей 1-43 01 05 «Промышленная  
теплоэнергетика» и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация  
энергооборудования организаций»  
дневной и заочной форм обучения**

**Электронный аналог печатного издания**

**Гомель 2011**

УДК 628.16(075.8)  
ББК 31.37я73  
О-34

*Рекомендовано к изданию научно-методическим советом  
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 6 от 24.11.2010 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого  
*Т. В. Алферова*

**Овсянник, Н. В.**

О-34 Водоподготовка и водный режим котельных установок : лаборатор. практикум по одному курсу для студентов специальностей 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» днев. и заоч. форм обучения / Н. В. Овсянник, Е. Н. Волкова, Д. С. Трошев. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2011. – 40 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://lib.gstu.local>. – Загл. с титул. экрана.

ISBN 978-985-535-002-7.

Содержит лабораторные работы, позволяющие экспериментальным путем проверить и подтвердить теоретические положения методов обработки воды, способов подготовки питательной воды, водных режимов ТЭЦ и центральных котельных. Направлен на формирование у студентов навыков работы с оборудованием химических лабораторий теплоэнергетических предприятий, изучение методик проведения экспериментов.

Для студентов специальностей 1-43 01 05 «Промышленная теплоэнергетика» и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» дневной и заочной форм обучения.

УДК 628.16(075.8)  
ББК 31.37я73

ISBN 978-985-535-002-7

© Овсянник Н. В., Волкова Е. Н.  
Трошев Д. С., 2011  
© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2011

## **Общие указания по выполнению и оформлению лабораторных работ**

Перед выполнением работ необходимо изучить основные теоретические положения, ознакомиться с лабораторными стендами. После завершения лабораторных работ каждый студент должен составить отчет, в котором приводятся основные теоретические положения, рисунок лабораторной установки, по результатам опытов следует выполнить расчеты и сопроводить их необходимыми пояснениями. Отчет завершается аргументированным выводом. Методы оценки результатов измерений и расчетов приведены в описании работ. Отчет представляется студентом при защите лабораторных работ.

Приведенные в лабораторных работах методики могут использоваться при оценке показателей качества воды для следующих целей водопользования: для хозяйственно-питьевого водоснабжения; при подготовке добавочной воды для электростанций, работающих на органическом топливе; при подготовке добавочной воды для паровых котлов различного назначения, для подпитки тепловых сетей.

Выполнение лабораторных работ и обработка результатов опытов позволяют оценить качество воды. В реальных условиях эксплуатации знание характеристик используемой воды необходимо для организации оптимальных режимов работы теплоэнергетического оборудования. При анализе результатов лабораторных опытов целесообразно отметить:

1. К какому типу водопользования следует отнести анализируемую пробу воды.
2. Влияние исследуемой воды, учитывая полученные в опытах характеристики, на работу теплоэнергетического оборудования (образование накипи, шлама, коррозии).
3. Рекомендации по обработке исходной воды для получения воды с нормированными характеристиками.

Некоторые справочные материалы, необходимые для анализа, приведены в приложении.

## **Лабораторная работа № 1**

### **Определение сухого остатка воды**

**Цель работы:** приобрести практические навыки определения сухого остатка природной воды опытным путем.

#### **Теоретическая часть**

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

1. *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  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Na^+$ ,  $K^+$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $NO_3^-$ ,  $NO_2^-$ .

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.

3. *Грубодисперсные примеси* имеют размер частиц более  $10^{-4}$  мм. Это растительные остатки, частицы песка, глины и т. д.

*Сухой остаток* (мг/кг) определяют путем выпаривания определенного объема предварительно профильтрованной пробы и последующего просушивания остатка при температуре 110–120 °С.

*Сухой остаток* выражает содержание растворенных в воде минеральных и органических примесей, нелетучих при указанной температуре. Содержащиеся в природной воде  $Ca(HCO_3)_2$  и  $Mg(HCO_3)_2$  при выпаривании разлагаются с выделением  $H_2O$  и  $CO_2$ , и в сухом остатке появляются  $CaCO_3$  и  $MgCO_3$ ; это надо иметь в виду, сравнивая сухой остаток с минеральным.

*Минеральный остаток (общее солесодержание)* подсчитывается путем суммирования концентраций катионов и анионов, определенных при проведении полного химического анализа воды.

*Прокаленный остаток* (мг/кг) характеризует содержание в воде минеральных веществ; его определяют путем прокаливания при 800 °С сухого остатка. При прокаливании сгорают органические вещества и частично разлагаются карбонаты.

*Плотным остатком* называется остаток, получающийся при упаривании нефльтрованной воды, содержащей также и грубодисперсные примеси.

Для установок с прямоточной схемой водоподготовки натрий-катионитовым методом двухступенчатого умягчения прямое определение сухого остатка котловой воды может быть заменено косвенным определением его на общей щелочности котловой воды. Зависимость солесодержания от щелочности  $S = f(\text{Щ})$  может быть установлена как расчетным путем по анализу исходной воды, так и путем ряда весовых анализов котловой воды.

Для исходных вод с содержанием хлоридов более 5 мг/кг определение сухого остатка котловой воды может достаточно точно производиться косвенно и по концентрации хлор-иона. Зависимость солесодержания от концентрации хлор-иона  $S = f(\text{Cl})$  устанавливается экспериментальным путем на основании нескольких анализов котловой воды с параллельным определением сухого остатка и содержания хлоридов.

Весовой метод определения сухого остатка ввиду значительной длительности применяют как контрольный для тарирования приборов-солемеров, определяющих сухой остаток косвенным методом по электропроводности раствора.

### ***Практическая часть***

Необходимое оборудование: мерная колба 100 мл, фарфоровая чаша, нагревательный прибор, бумажный фильтр, аналитические весы.

#### ***Порядок проведения эксперимента***

1. Мерной колбой отмерить 100 мл исследуемой воды.
2. Произвести взвешивание пустой чистой фарфоровой чаши на аналитических весах.
3. Налить анализируемую воду в чашу.
4. Произвести выпаривание анализируемой пробы.
5. Чаша с сухим остатком должна охлаждаться не менее 20 мин.
6. Произвести взвешивание чаши с сухим остатком на аналитических весах.
7. Результаты эксперимента занести в таблицу результатов (табл. 1.1) и произвести необходимые расчеты.
8. По результатам эксперимента сделать выводы.

### **Обработка результатов**

Если вес в граммах пустой чашки обозначить А, вес чашки с высушенным сухим остатком – Б, то величина сухого остатка (СО) может быть вычислена по следующей формуле:

$$CO = \frac{1000}{V} (B - A), \text{ мг/кг}, \quad (1.1)$$

где  $V$  – объем воды, подвергнутый выпариванию, мл; 1000000 получается при переводе граммов в (А и Б) в миллиграммы и пересчете определяемой величины на 1 кг воды.

*Таблица 1.1*

**Определение сухого остатка**

<b>А, г</b>	<b>Б, г</b>	<b>V, мл</b>	<b>Сухой остаток СО, мг/кг</b>

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Назовите виды примесей и дайте их характеристику.
2. Приведите классификацию и определения видов остатков.
3. Дайте экспериментальное определение сухого остатка.
4. Какие технологические методы применяются для уменьшения сухого остатка исходной воды?

## **Лабораторная работа № 2**

### **Определение водородного показателя ( $pH$ ) воды**

**Цель работы:** практически освоить методику определения реакции воды (кислая, нейтральная, щелочная); приобрести навыки экспериментальной оценки качества воды, используемой в теплоэнергетических установках.

#### **Теоретическая часть**

*Водородный показатель* характеризует концентрацию свободных ионов водорода в воде.

$pH$  воды – один из важнейших рабочих показателей качества воды, во многом определяющих характер химических и биологических процессов, происходящих в воде. В зависимости от величины  $pH$  может изменяться скорость протекания химических реакций, степень коррозионной агрессивности воды, токсичность загрязняющих веществ и т. д.

Контроль за уровнем  $pH$  особенно важен на всех стадиях водоочистки, т. к. его «уход» в ту или иную сторону может не только существенно сказаться на запахе, привкусе и внешнем виде воды, но и повлиять на эффективность водоочистных мероприятий. Оптимальная требуемая величина  $pH$  варьируется для различных систем водоочистки в соответствии с составом воды, характером материалов, применяемых в системе распределения, а также в зависимости от применяемых методов водообработки.

Для удобства отображения был введен специальный показатель, названный  $pH$  и представляющий собой логарифм концентрации ионов водорода, взятый с обратным знаком, т. е.

$$pH = -\log[H^+]. \quad (2.1)$$

Если говорить проще, то величина  $pH$  определяется количественным соотношением в воде ионов  $H^+$  и  $OH^-$ , образующихся при диссоциации воды. Если в воде пониженное содержание свободных ионов водорода ( $pH > 7$ ) по сравнению с ионами  $OH^-$ , то вода будет иметь щелочную реакцию, а при повышенном содержании ионов  $H^+$  ( $pH < 7$ ) – кислотную. В идеально чистой дистиллированной воде эти ионы будут уравнивать друг друга. В таких случаях вода нейтральна и  $pH = 7$ . При растворении в воде различных химических веществ этот баланс может быть нарушен, что приводит к изменению уровня  $pH$ .

Очень часто показатель  $pH$  путают с такими параметрами, как кислотность и щелочность воды. Важно понимать разницу между ними. Главное заключается в том, что  $pH$  – это показатель интенсивности, но не количества. То есть  $pH$  отражает степень кислотности или щелочности среды, в то время как кислотность и щелочность характеризуют количественное содержание в воде веществ, способных нейтрализовывать, соответственно, щелочи и кислоты.

Таблица 2.1

### Классификация вод в зависимости от уровня $pH$

Группа	$pH$	Примечание
Сильнокислые воды	$< 3$	Результат гидролиза солей тяжелых металлов (шахтные и рудничные воды)
Кислые воды	3–5	Поступление в воду угольной кислоты, фульвокислот и других органических кислот в результате разложения органических веществ
Слабокислые воды	5–6,5	Присутствие гумусовых кислот в почве и болотных водах (воды лесной зоны)
Нейтральные воды	6,5–7,5	Наличие в водах $Ca(HCO_3)_2$ , $Mg(HCO_3)_2$
Слабощелочные воды	7,5–8,5	Наличие в водах $Ca(HCO_3)_2$ , $Mg(HCO_3)_2$
Щелочные воды	8,5–9,5	Присутствие $Na_2CO_3$ или $NaHCO_3$
Сильнощелочные воды	$> 9,5$	Присутствие $Na_2CO_3$ или $NaHCO_3$

### Практическая часть

Необходимое оборудование и реактивы: универсальная индикаторная бумага ( $pH = 1 \div 10$ ); растворы индикаторов: фенолфталеина, метилоранжа и смешанного индикатора;  $pH$ -метр.

Определить значение  $pH$  воды, используя три методики:

1. Приблизительно оценить  $pH$  с помощью кислотно-основных индикаторов, для чего в испытуемую воду опустить универсальную индикаторную бумагу и сравнить ее окраску со шкалой эталонов, имеющейся в пакете для этой бумаги.

2. Правильность показаний индикаторной бумаги проверить путем контрольного определения  $pH$  с применением растворов индикаторов, используя при этом данные табл. 2.2.

3. Точно измерить  $pH$  воды с помощью  $pH$ -метра.



Таблица 2.2

**Изменение окраски веществ-красителей в диапазоне изменений  $pH$** 

Индикаторы	Окраска индикатора при $pH$					
	< 5	5–6	6–7	7–8	8–9	> 9
фенол-фталеин	бесцветная	бесцветная	бесцветная	бесцветная	слаборозовая	ярко-розовая
метилоранж	розовая	оранжевая	соломенная	желтая	желтая	желтая
смешанный	фиолетовая	грязно-серая	слабо-зеленая	ярко-зеленая	ярко-зеленая	ярко-зеленая

**Контрольные вопросы и задания**

1. Что такое водородный показатель?
2. Дайте определение водородного показателя  $pH$ .
3. Приведите классификацию воды в зависимости от уровня  $pH$ .

## **Лабораторная работа № 3**

### **Определение щелочности воды**

**Цель работы:** закрепить теоретические знания по щелочности воды и методам ее устранения; приобрести навыки определения гидратной и общей щелочности воды.

#### **Теоретическая часть**

*Общей щелочностью* воды называется выраженная в мг-экв/кг суммарная концентрация содержащихся в воде анионов  $\text{OH}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{2-}$ ,  $\text{HSiO}_3^-$ ,  $\text{SiO}_3^{2-}$  и некоторых солей слабых органических кислот (гуматов). В соответствии с этим различают щелочность *гидратную, карбонатную, бикарбонатную, фосфатную, силикатную, гуматную* и др.

1 мг-экв/кг щелочности воды соответствует содержанию 40,01 мг/кг NaOH, или 53 мг/кг  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , или 84,02 мг/кг  $\text{NaHCO}_3$ .

В практике эксплуатации котельных установок и в нормативных требованиях к качеству котельной воды используется так называемая относительная щелочность, определяемая по формуле

$$\text{Щ}_{\text{отн}} = \frac{\text{Щ}_0 \cdot 40}{S_{\text{кв}}} 100, \%, \quad (3.1)$$

где  $\text{Щ}_0$  – общая щелочность котловой воды, мг-экв/кг;  $S_{\text{кв}}$  – сухой остаток котловой воды, мг/кг; 40 – эквивалентная масса NaOH.

Определение щелочности воды основано на титровании растворенных в воде щелочных соединений кислотой в присутствии индикаторов, меняющих свою окраску в зависимости от реакции среды.

При титровании с метилоранжем или смешанным индикатором определяется общая щелочность, условно характеризующая суммарное содержание бикарбонатов, карбонатов, гидратов, 2/3 ортофосфатов и гуматов. При титровании с фенолфталеином определяются полностью гидраты, 1/2 карбонатов, 1/3 ортофосфатов и гуматы.

#### **Практическая часть**

Необходимые реактивы:

- 0,1 н. раствор серной или соляной кислоты;
- 0,01 н. раствор серной или соляной кислоты;
- 1%-й спиртовой раствор фенолфталеина;

- 0,1%-й водный раствор метилоранжа;
- смешанный индикатор (смесь равных объемов спиртовых растворов метилового красного – 0,25 % и метиленового голубого – 0,17 %).

### ***Порядок проведения эксперимента***

Для определения щелочности *исходной, известкованной, коагулированной, катионированной и питательной* воды 100 мл испытуемой воды помещают в коническую колбу, прибавляют одну-две капли фенолфталеина и в случае появления розовой окраски титруют 0,1 н. раствором кислоты до обесцвечивания. Отметив расход кислоты, добавляют две-три капли метилоранжа или смешанного индикатора и продолжают титрование до изменения окраски.

Если проба после добавления фенолфталеина не изменила окраску, сразу прибавляют метилоранж или смешанный индикатор и титруют 0,1 н. раствором кислоты до перехода окраски. Количество миллилитров 0,1 н. раствора кислоты, израсходованной на титрование по фенолфталеину, численно соответствует щелочности воды по фенолфталеину в мг-экв/кг. Количество миллилитров 0,1 н. раствора кислоты, израсходованной суммарно на титрование пробы по фенолфталеину и метилоранжу или фенолфталеину и смешанному индикатору, численно соответствует общей щелочности воды в мг-экв/кг.

Для определения щелочности *котловой воды* 25–50 мл котловой воды помещают в коническую колбу, разбавляют до 100 мл дистиллятом и определяют общую щелочность титрованием 0,1 н. раствором кислоты в присутствии смешанного индикатора, дающего более резкий переход окраски в конце титрования.

Количество миллилитров 0,1 н. раствора кислоты, израсходованной на титрование 50 мл пробы, умноженное на два, а при титровании 25 мл пробы, умноженное на четыре, определяет общую щелочность воды в мг-экв/кг.

Для определения щелочности *конденсатных вод* (при щелочности ниже 0,2 мг-экв/кг) по 100 мл испытуемой воды помещают в две одинаковые конические колбы, добавляют по две-три капли метилоранжа или смешанного индикатора и первую титруют 0,01 н. раствором кислоты из микробюретки с оттянутым носиком до первого изменения окраски по сравнению со второй колбой, служащей «свидетелем». Сравнение производят на белом фоне при сильном освещении.

Количество миллилитров 0,01 н. раствора кислоты, израсходованной на титрование пробы, деленное на 10, численно равно щелочности воды в мг-экв/кг.

### **Обработка результатов**

Результаты измерений занести в табл. 3.1.

Таблица 3.1

#### **Результаты эксперимента**

Номер пробы	Расход кислоты на титрование, мл		
	по фенолфталеину	по метилоранжу	общий расход
1			
2			
Среднее значение			

Определяем щелочность воды:

$$\text{Щ}_{\text{отн}} = 1000 \frac{V_{\text{мо}} + V_{\text{фф}}}{V_{\text{H}_2\text{O}}} C_{\text{HCl}}, \quad (3.2)$$

где  $V_{\text{фф}}$ ,  $V_{\text{мо}}$  – расход соляной кислоты на титрование по фенолфталеину и метилоранжу, соответственно, мл;  $C_{\text{HCl}}$  – нормальность раствора кислоты;  $V_{\text{H}_2\text{O}}$  – объем анализируемой пробы, мл.

Сделать выводы о пригодности использования воды для питания паровых котлов и для подпитки теплосети.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Как определяется общая щелочность и ее виды?
2. Что такое относительная щелочность?
3. Назовите основные индикаторы.
4. В чем состоит сущность титрования в присутствии индикаторов; щелочность по фенолфталеину и метилоранжу?
5. Как определяется щелочность исходной, известкованной, коагулированной, катионированной и питательной воды?
6. Как определяется щелочность котловой воды?
7. Как определяется щелочность конденсатных вод?

## **Лабораторная работа № 4**

### **Определение жесткости воды**

**Цель работы:** закрепить теоретические знания по жесткости воды и методам ее устранения; приобрести навыки определения временной и общей жесткости воды; провести анализ пригодности воды к использованию в хозяйственно-бытовых целях и в теплогенерирующих установках.

#### **Теоретическая часть**

*Жесткость воды* – мера содержания в воде растворенных солей кальция и магния. Источником их являются, в основном, известняки и доломиты. Различают *постоянную жесткость*, *временную жесткость* и *общую жесткость* воды.

*Постоянная жесткость воды* (некарбонатная)  $J_{п}$  – часть общей жесткости воды, остающаяся после кипячения воды при атмосферном давлении в течение 1 ч. Обусловливается содержанием сульфатов, хлоридов и других (кроме бикарбонатов) солей кальция и магния. При нагревании или кипячении воды они остаются в растворе.

*Временная жесткость воды* (устраняемая, карбонатная)  $J_{вр}$  – часть общей жесткости, удаляющаяся кипячением воды при атмосферном давлении в течение определенного времени. Она равна разности между общей и постоянной жесткостью. Обусловливается содержанием бикарбонатов. При нагревании или кипячении воды бикарбонаты переходят в нерастворимые карбонаты, при этом жесткая вода умягчается.

Также различают *карбонатную* и *некарбонатную жесткость*.

*Карбонатной жесткостью*  $J_{к}$  называется часть общей жесткости, эквивалентная концентрации карбонатов и гидрокарбонатов кальция и магния.

*Некарбонатная жесткость*  $J_{нк}$  – это часть общей жесткости, равная разности между общей и карбонатной жесткостью.

*Общая жесткость воды*  $J$  – определяется как суммарное содержание в воде солей кальция и магния, выражается как сумма карбонатной и некарбонатной жесткости:

$$J = J_{к} + J_{нк}. \quad (4.1)$$

Жесткость воды выражается в мг-экв/кг или мкг-экв/кг.

Для определения жесткости в мг-экв/кг нужно количество вещества  $G$  в миллиграммах, растворенного в 1 кг воды (мг/кг), разделить на его эквивалентную массу:

$$Ж = \frac{G}{\Xi}. \quad (4.2)$$

Эквивалентная масса равна молекулярной массе вещества  $M$ , деленной на ее валентность  $V$ :

$$\Xi = \frac{M}{V}. \quad (4.3)$$

1 мг-экв/кг жесткости воды соответствует содержанию в 1 кг воды 20,04 мг иона кальция ( $Ca^{2+}$ ) или 12,16 мг иона магния ( $Mg^{2+}$ ).

Для пересчета концентрации кальция и магния, выраженной в мг/кг, в мг-экв/кг, ее делят на эквивалентные массы этих катионов, т. е.

$$Ж_0 = \frac{Ca^{2+}}{20,04} + \frac{Mg^{2+}}{12,16}, \quad (4.4)$$

где  $Ca^{2+}$  и  $Mg^{2+}$  – концентрация в воде катионов кальция и магния, мг/кг; 20,04 и 12,16 – эквивалентные массы кальция и магния.

Если

$$\frac{Ca^{2+}}{20,04} + \frac{Mg^{2+}}{12,16} > \frac{HCO_3^-}{61,02}, \quad (4.5)$$

то карбонатная жесткость (в мг-экв/кг) определяется по формуле

$$Ж_к = \frac{HCO_3^-}{61,02}, \quad (4.6)$$

где  $HCO_3^-$  – концентрация в воде бикарбонатных анионов, мг/кг; 61,0 – их эквивалентная масса.

Некарбонатная жесткость (в мг-экв/кг) в этом случае:

$$Ж_{нк} = Ж_0 - Ж_к. \quad (4.7)$$

Если

$$Ж_0 < \frac{HCO_3^-}{61,02}, \quad (4.8)$$

то  $Ж_к = Ж_0$  и  $Ж_{нк} = 0$ .

При оценке жесткости воды обычно воду характеризуют следующим образом:

Таблица 4.1

**Классификация вод в зависимости от величины жесткости**

Вода	Жесткость, мг-экв/л
Очень мягкая вода	до 1,5
Мягкая вода	от 1,5 до 4
Вода средней жесткости	от 4 до 8
Жесткая вода	от 8 до 12
Очень жесткая вода	более 12

В действующих санитарных правилах, нормах и гигиенических нормативах общая жесткость воды, используемой для питьевых и хозяйственно-бытовых нужд, нормируется: допустимое максимальное содержание солей жесткости в воде по суммарному содержанию в ней ионов кальция и магния составляет 7 ммоль/л.

Умягчение воды, т. е. снижение содержания в ней солей жесткости до требуемых нормативных значений, осуществляется одним из следующих способов: термическим, реагентным, катионитовым и комбинацией перечисленных способов (термохимическим и реагентно-катионитовым), причем термические и термохимические способы умягчения воды применяются в основном в теплоэнергетике.

В настоящее время наиболее широкое применение для систем водоснабжения получил катионитовый способ умягчения воды, т. е. снижения постоянной жесткости воды. Он основан на процессе ионного обмена. Ионный обмен базируется на способности некоторых веществ, называемых ионитами (ионитовые смолы), обменивать входящие в их состав ионы (например,  $H^+$  и  $Na^+$ ) на ионы солей жесткости, содержащиеся в воде, которые следует из нее удалить. При умягчении воды применяются не только  $H$ -катионитовые, но и  $Na$ -катионитовые фильтры, базирующиеся на использовании естественных (глауконитовых песков) и искусственных катионитов (сульфоуголь, вофатит, эспатит и др.).

**Практическая часть**

*Опыт 1. Определение временной жесткости воды*

Так как вода, содержащая гидрокарбонаты кальция и магния, имеет щелочную реакцию, определение карбонатной жесткости производится непосредственным титрованием воды хлороводородной (соляной) кислотой в присутствии индикатора – метилового оранжевого.

### Порядок проведения эксперимента

1. Для анализа в коническую колбу отмерить с помощью мерного цилиндра 100 мл исследуемой воды.
2. Добавить 2–3 капли индикатора метилового оранжевого.
3. В приготовленную заранее бюретку налить 0,1 н. раствор HCl. Установить уровень на нулевое деление и по каплям приливать хлороводородную (соляную) кислоту в воду до изменения окраски раствора от желтой до оранжево-розовой.
4. Записать объем израсходованной на титрование кислоты.
5. Титрование повторить еще два раза, каждый раз доливая в бюретку кислоту до нулевого уровня.

### Обработка результатов

Результаты титрования записать в табл. 4.2.

Таблица 4.2

#### Результаты эксперимента

№	Объем H <sub>2</sub> O, V <sub>H<sub>2</sub>O</sub> , мл	Объем р-ра HCl, V <sub>HCl</sub> , мл	Средний объем р-ра HCl, V <sub>HClcp</sub> , мл	Нормальность раствора HCl, C <sub>HCl</sub> , моль /л

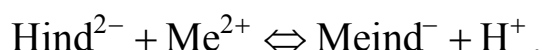
Рассчитать временную жесткость воды в мг-экв/кг по формуле

$$Ж_{вр} = \frac{C_{HCl} V_{HCl}}{V_{H_2O}} 1000. \quad (4.9)$$

*Опыт 2. Определение общей жесткости воды трилонометрическим методом*

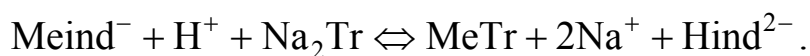
Метод основан на комплексонометрическом титровании исследуемой воды с применением реактива трилон Б (натриевой соли этилендиаминтетрауксусной кислоты) в присутствии индикатора хромогена черного Т.

В присутствии ионов Ca<sup>2+</sup> и Mg<sup>2+</sup> при pH = 7–11 индикатор за счет образования комплексов с этими ионами приобретает характерный лилово-красный цвет:





При добавлении трилона Б эти комплексы распадаются и ионы  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  связываются в бесцветный более прочный комплекс с трилоном Б, а раствор приобретает синюю окраску индикатора:



Изменение окраски происходит в тот момент, когда израсходуются все ионы  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ . При этом количество вступившего в реакцию трилона Б эквивалентно количеству ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ .

### Порядок проведения эксперимента

1. Для анализа в коническую колбу 250–300 мл отмерить необходимый объем прозрачной воды.

Таблица 4.3

**Количество анализируемой воды в зависимости от жесткости**

Жесткость воды, мг-экв/кг	Необходимый объем воды, мл
до 5,0	100
от 5,0 до 10,0	50
от 10,0 до 20,0	25

2. Объем отобранной пробы доводят дистиллированной водой до 100 мл.

3. Добавить 5 мл аммиачного буферного раствора (20 г химически чистого хлористого железа растворяют в дистиллате, добавляют 100 мл концентрированного раствора химически чистого аммиака плотностью  $0,91 \text{ г/см}^3$  и разбавляют до 1 л дистиллатом).

4. Добавить 7–8 капель индикатора.

5. 0,1 н. раствором трилона Б оттитровать пробу воды до перехода лилово-красной окраски в синюю.

Титрование повторить еще 2 раза.

### Обработка результатов

Результаты титрования записать в табл. 4.4.

Таблица 4.4

**Результаты эксперимента**

Номер титрования	Объем $\text{H}_2\text{O}$ , $V_{\text{H}_2\text{O}}$ , мл	Объем р-ра трилона Б, $V_{\text{тр Б}}$ , мл	Средний объем р-ра трилона Б, $V_{\text{тр Б ср}}$ , мл	Нормальность р-ра трилона Б, $C_{\text{н тр Б}}$ , моль/л

Рассчитать общую жесткость воды по формуле

$$Ж_{\text{общ}} = \frac{C_{\text{н трБ}} V_{\text{трБ}}}{V_{\text{H}_2\text{O}}} 1000. \quad (4.10)$$

Рассчитать постоянную жесткость воды, зная ее общую и временную жесткость.

### ***Контрольные вопросы***

1. Что такое жесткость воды?
2. Какие виды жесткости существуют?
3. В каких единицах выражается жесткость воды?
4. Какому содержанию  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  соответствует жесткость 1 мг-экв/л?
5. Как определить карбонатную и некарбонатную жесткость воды?
6. Что такое временная и постоянная жесткость?
7. В чем состоит трилометрический метод определения общей жесткости?
8. Какие методы умягчения воды используются?

## *Лабораторная работа № 5*

### **Удаление из воды коллоидных примесей методом коагуляции**

**Цель работы:** закрепить теоретические знания процесса коагуляции и приобрести практические навыки определения дозы коагулянта и щелочи при помощи лабораторного анализа.

#### *Теоретическая часть*

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

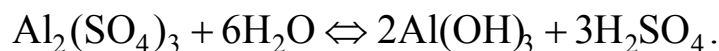
Коллоидные растворы отличаются высокой устойчивостью. Это значит, что коллоидные частички не способны к самопроизвольному соединению в крупные образования и выпадению из раствора, если отсутствуют побудители такого процесса. Причина этого заключается в том, что коллоидные частицы данного вещества несут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

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

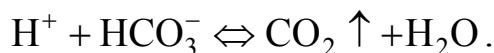
Спустя некоторое время после ввода в пробу определенной дозы коагулянта происходит помутнение воды. С течением времени мутность усиливается, постепенно образуются крупные рыхлые хлопья, оседающие на дно сосуда и увлекающие за собой все загрязнения. Следовательно, видимым эффектом коагуляции является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

В практике водоприготовления в качестве коагулянтов применяют сернокислое железо закисное ( $\text{FeSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ ), сернокислый алюминий ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \times 18\text{H}_2\text{O}$ ), хлорное железо ( $\text{FeCl}_3$ ), которые вводятся в воду в виде растворов концентрацией 5–10 %. При введе-

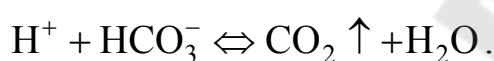
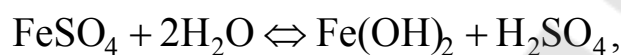
нии в воду, например, сернокислого алюминия вначале происходит его гидролиз:



Образующаяся кислота нейтрализуется щелочностью воды:



Если вместо  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  в воду вводится сернокислое железо, эти процессы также будут иметь место:



Коагулирующим действием обладает не  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , а гидрат окиси железа  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . Следовательно, при применении в качестве коагулянта двухвалентного железа необходимо обеспечить окисление его в трехвалентное растворенным в воде кислородом:



которое в щелочной среде протекает сравнительно легко.

Приведенные реакции показывают, что при коагуляции щелочность воды понижается, а концентрация в ней свободной углекислоты возрастает. Ввиду этого коагулируемая вода должна обладать некоторым минимумом щелочности, мг-экв/кг, определяемым выражением

$$\text{Щ}_{\text{мин}} = d_{\text{кг}} + 0,4, \quad (5.1)$$

где  $d_{\text{кг}}$  – доза коагулянта, мг-экв/л.

Если фактическая щелочность обрабатываемой воды  $\text{Щ}_0 < \text{Щ}_{\text{мин}}$ , необходимо вводить в нее щелочь ( $\text{NaOH}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) в количестве

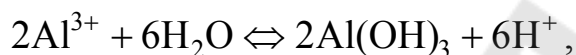
$$\text{Щ}_{\text{кг}} = d_{\text{кг}} + 0,4 - \text{Щ}_0. \quad (5.2)$$

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

При проведении коагуляции стремятся к тому, чтобы введенное в воду количество коагулянта было в последующем максимально выделено из воды в виде осадка и удалено в осветлителях или в осветли-

тельных фильтрах. В противном случае создается опасность загрязнения ионита и наноса в котельные агрегаты железа или алюминия. Ввиду этого важно создать такие условия, при которых введенный в воду коагулянт был бы полностью гидролизован с образованием труднорастворимых гидроокисей.

Процесс коагуляции отличается высокой чувствительностью к условиям, в которых он проводится. На него оказывают влияние реакция среды ( $pH$ ), доза коагулянта, температура воды и др. Влияние  $pH$  особенно существенно при коагуляции воды сернокислым алюминием. Как следует из реакции гидролиза



увеличение концентрации водородных ионов, т. е. понижение  $pH$  воды, сдвигает равновесие этого процесса влево. При достаточно низком  $pH$   $Al(OH)_3$  переходит в раствор и процесс коагуляции нарушается. Гидрат окиси алюминия растворяется и при достаточно высоком  $pH$  ( $>8$ ) с образованием алюминатов:



Поэтому этот коагулянт не следует применять, если обрабатываемая вода имеет  $pH > 8$ , как, например, на установках с известкованием. В этих случаях он заменяется соединениями двух- или трехвалентного железа, коагуляция которого успешно проводится и при  $pH > 8$ .

Значение  $pH$  и доза коагулянта для данной воды устанавливаются опытным путем в лаборатории. Ориентировочно можно считать, что  $pH$  при употреблении соединений алюминия находится в пределах 5–7 и железа – 8–10. Доза сернокислого алюминия составляет 0,2–1, а закисного железа – 0,1–0,5 мг-экв/л. Оптимальная температура коагулируемой воды – 303–313 К (30–40 °С).

### **Порядок выполнения эксперимента**

Определяют общую щелочность исходной воды. Если она окажется больше 1 мг-экв/кг, то опыты проводят с применением одного только коагулянта. В противном случае добавляют и раствор щелочи.

Необходимую дозировку реагентов находят следующим образом:

1. Приготавливают 5–7 штук цилиндров или колб емкостью 500 мл.
2. Обрабатываемую воду подогревают до 30–40 °С и наливают в цилиндры или колбы.

3. Дозировку коагулянта находят следующим образом: в ряд колб с подогретой водой из бюретки вводят 1%-й раствор  $Al_2(SO_4)_3$ : в первый цилиндр – 2 мл, во второй – 3 мл, в третий – 4 мл и т. д. Раствор перемешивают и в течение 20 мин наблюдают за образованием хлопьев. Выбирают дозировку коагулянта, при которой процесс образования хлопьев проходит быстрее всего. Дозу коагулянта, добавленную в эту колбу, считают оптимальной для данной воды.

4. Определяют дозировку едкого натра. Готовят свежую партию подогретой воды. В первые две колбы вводят дозу коагулянта несколько меньшую, чем было установлено в первом опыте (на 0,5 мл), во вторые две колбы – установленную в первом опыте дозу и, наконец, в следующие две колбы вводят на 0,5 мл коагулянта больше установленной дозы.

Раствор тщательно перемешивают стеклянной палочкой. Сначала интенсивно в течение 30–40 с, а затем медленно в течение 15 мин. Из бюретки вводят едкий натр. Рекомендуется вводить 0,01 н. раствора, 1 мл которого содержит 0,4 мг NaOH.

В первые колбы вводят по 5 мл, во вторые колбы – 6 мл, затем 7 и 8 мл. После введения едкого натра растворы вновь тщательно перемешивают и наблюдают за образованием хлопьев в течение 30 мин.

5. В качестве необходимой дозировки коагулянта и едкого натра принимают ту, при которой наблюдается полное и быстрое образование и оседание хлопьев гидрата окиси алюминия (за 15–20 мин) и снижение окисляемости на 60–75 %.

### **Обработка результатов**

Принятая дозировка коагулянта \_\_\_\_ мл, что составляет \_\_\_\_ мг/л или \_\_\_\_ мг-экв/л.

Дозировка щелочи составляет \_\_\_\_ мл, т. е. \_\_\_\_ мг-экв/л.

### **Контрольные вопросы и задания**

1. Что такое физика процесса коагуляции?
2. Назовите коагулянты и их химические формулы.
3. Каково влияние  $pH$  показателя и температурного режима на процесс коагуляции?
4. Как определяются дозы коагулянтов в процессе коагуляции?
5. Как определяются дозировки щелочи?

## **Лабораторная работа № 6**

### **Умягчение воды методом осаждения накипеобразователей**

**Цель работы:** закрепить теоретические знания по умягчению воды методом осаждения; определить необходимое для умягчения воды количество извести и соды.

#### **Теоретическая часть**

Суммарное содержание в воде всех кальциевых и магниевых соединений называют *общей жесткостью* воды.

Удаление из воды солей жесткости называется ее *умягчением*. Умягчение воды методами осаждения состоит в переводе солей кальция и магния в нерастворимые соединения, которые осаждаются в осветлителях и задерживаются в осветлительных фильтрах.

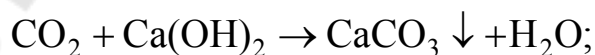
Существует несколько методов осаждения. К ним относятся: *известкование, известково-содовый, едконатровый* методы, *внутрикотловая обработка воды, термический и магнитный* методы.

#### *Известкование*

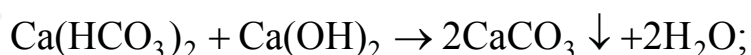
Как и все методы осаждения, известкование основано на связывании ионов, подлежащих удалению, в малорастворимые соединения, осаждаемые в виде шлама, который затем удаляется из обрабатываемой воды путем фильтрования. Основным назначением известкования является удаление из воды связанной и свободной углекислоты, снижение щелочности и сухого остатка исходной воды с одновременным ее умягчением. Кроме того, известкованием, совмещенным с коагуляцией, достигается обезжелезивание поверхностной воды, удаление органических веществ, цветности воды и частичное ее обескремнивание.

Реакции процесса известкования в молекулярной форме:

– удаление свободной углекислоты:



– удаление кальциевой карбонатной жесткости:

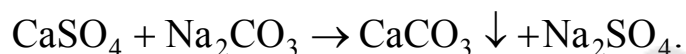
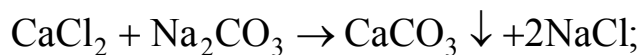


– удаление магниевой карбонатной жесткости:



### *Известково-содовый метод*

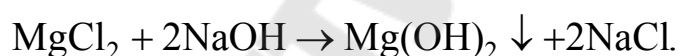
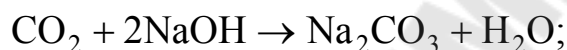
При применении известково-содового метода соли жесткости осаждаются совместно известью и содой. При этом магний удаляется полностью (магниевая жесткость переводится в кальциевую), а кальциевые соли некарбонатной жесткости удаляются содой.



Метод применяют для вод, в которых общая жесткость больше щелочности исходной воды.

### *Едконатровый метод*

Процесс обработки воды едким натром идет по следующим реакциям:



Удаление кальциевых солей некарбонатной жесткости осуществляется содой, образующейся в процессе предыдущих реакций.

Так как сода при едконатровом методе очистки образуется в количестве, эквивалентном карбонатной жесткости обрабатываемой воды, применение метода ограничивается условием

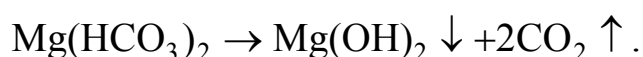
$$2\text{Щ}_{\text{и.в.}} + [\text{CO}_2]_{\text{и.в.}} = \text{Ж}_{\text{Ca}} + \text{Щ}_{\text{из}} + \text{K}, \quad (6.1)$$

где  $\text{Щ}_{\text{из}}$  – избыточная щелочность обработанной воды.

Кроме того, следует учитывать более высокую стоимость едкого натра по сравнению с известью.

### *Термический метод*

Этот метод эффективен при нагревании исходной воды до температуры кипения и энергичном ее перемешивании. При этом соли карбонатной жесткости разлагаются по реакциям:





Термический метод обработки применяется в случаях, когда не требуется глубокого умягчения воды и когда в исходной воде содержится в основном бикарбонат кальция, т. к. образование и выпадение в осадок  $Mg(OH)_2$  происходит очень медленно. Содержание органических веществ в исходной воде тормозит процесс кристаллизации и выпадения шлама, что также значительно снижает эффект термического метода. Указанные ограничения делают метод практически мало приемлемым.

Совмещение термического метода обработки с дозировкой в обрабатываемую воду реагентов: едкого натра, соды, натрий-катионированной воды называют термохимическим методом.

#### *Внутрикотловая обработка воды*

Данный метод осуществляется путем ввода в котел щелочных реагентов, которые в сочетании с подогревом воды в котле вызывают осаждение солей жесткости в виде нерастворимых соединений  $CaCO_3$  и  $Mg(OH)_2$ . Осуществление внутрикотловой обработки обязательно должно сопровождаться периодическим или непрерывным удалением из котла шлама (продувкой).

#### *Магнитный метод*

Этот метод обработки для паровых котлов является разновидностью внутрикотловой обработки и основан на известном физическом явлении, заключающемся в том, что вода после воздействия на нее магнитного поля определенной напряженности и полярности при нагреве ее в котле выше  $100\text{ }^\circ\text{C}$  не дает накипных отложений на поверхности нагрева, а соли жесткости выпадают в виде шлама в толще котловой воды. Шлам должен непрерывно удаляться из нижних точек котла (грязевиков, нижних коллекторов) во избежание образования так называемой «вторичной» накипи.

### **Порядок выполнения эксперимента**

Необходимое для умягчения воды количество извести и соды в мг-экв/кг можно определить по формулам:

$$G_{CaO} = 28(J_K + J_M + C + 0,35); \quad (6.2)$$

$$G_{NaCO_3} = 53(J_{HK} + 2,0), \quad (6.3)$$

где 28 – эквивалент извести; 53 – эквивалент соды;  $J_K$ ,  $J_{HK}$ ,  $J_M$  – карбонатная, некарбонатная и магниевая жесткости умягчаемой воды, мг-экв/кг;  $C$  – концентрация  $CO_2$  в умягчаемой воде, мг-экв/кг; 0,35 и 2,0 – избыток извести и соды, мг-экв/кг.

В лабораторных условиях для умягчения берется  $V = 500$  мл воды, а дозировку реагентов производят в виде растворов, имеющих концентрации  $K_{\text{CaO}}$ , мг/мл и  $K_{\text{Na}_2\text{CO}_3}$ , мг/мл. Объемное количество растворов реагентов данных концентраций в мл, необходимых для умягчения воды, можно определить по формулам:

$$V_{\text{CaO}} = \frac{G_{\text{CaO}}}{K_{\text{CaO}}} \cdot \frac{V}{1000}; \quad (6.4)$$

$$V_{\text{Na}_2\text{CO}_3} = \frac{G_{\text{Na}_2\text{CO}_3}}{K_{\text{Na}_2\text{CO}_3}} \cdot \frac{V}{1000}. \quad (6.5)$$

В стакан емкостью 750 мл наливают мерным цилиндром 500 мл воды, подлежащей умягчению, и нагревают ее на электрической плитке до температуры 70–100 °С. Затем при помощи пипетки или цилиндра вводят необходимые дозы реагентов в виде растворов известной концентрации.

После ввода реагентов содержимое стакана тщательно перемешивают стеклянной палочкой и выпавшему осадку дают отстояться в течение одного часа. Потом его отфильтровывают и производят определение общей жесткости и щелочности умягченной воды.

Таблица 6.1

#### Результаты измерений

Определяемые показатели	Исходная вода	Умягченная вода
Жесткость, мг-экв/кг		
Щелочность, мг-экв/кг		

#### Контрольные вопросы и задания

1. Что такое умягчение воды методом осаждения?
2. Назовите основные методы осаждения.
3. В каких случаях применяется каждый из методов осаждения?
4. В чем заключается химизм умягчения воды содово-известковым методом?

## *Лабораторная работа № 7*

### **Умягчение воды методом катионного обмена**

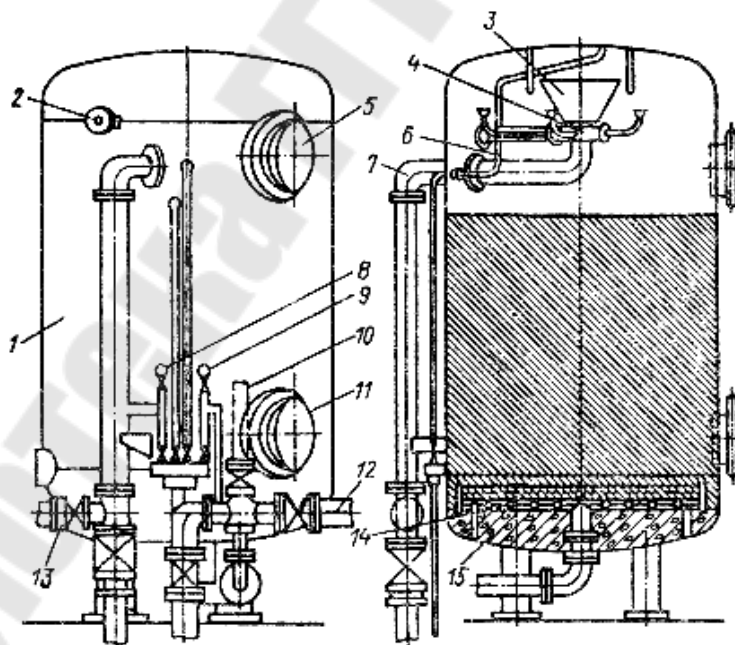
**Цель работы:** закрепить теоретические знания по умягчению воды методом катионного обмена; изучить устройство и принцип действия катионитных фильтров; произвести замеры жесткости исходной и умягченной воды.

#### *Теоретическая часть*

*Катионитные фильтры* предназначены для умягчения воды методом ионного обмена.

Основными элементами катионитных установок являются фильтры. Фильтры могут быть использованы как Na-катионитные, так и H-катионитные. Последние отличаются тем, что имеют защитное покрытие внутренней поверхности корпуса и трубопроводов, а распределительные устройства их и арматура изготавливаются из нержавеющей стали. Защитные покрытия осуществляются перхлорвиниловыми лаками, эпоксидной смолой или путем гуммирования.

Фильтр (рис. 7.1) состоит из металлического корпуса цилиндрической формы с приваренными к нему сферическими днищами и рассчитан на внутреннее давление до 0,6 МПа (6 кгс/см<sup>2</sup>).



*Рис. 7.1. Na-катионитный фильтр:*

- 1 – корпус; 2 – трубопровод реагентов; 3 – воронка; 4 – устройство распределения реагентов; 5, 11 – люки; 6 – воздушная трубка; 7 – труба; 8, 9 – манометры; 10 – трубопровод промывной воды; 12 – отводной трубопровод; 13 – трубопровод подачи воды; 14 – дренажное устройство; 15 – бетон

### Порядок выполнения эксперимента

Схема лабораторной установки для H–Na-катионирования изображена на рис. 7.2. Она состоит из двух фильтров диаметром 80 мм, заполненных сульфоуглем, и двух бутылей с растворами реагентов. Вода подводится к фильтрам и отводится от них по стеклянным трубкам диаметром 8–10 мм. Для управления установкой служат стеклянные краны 1–11.

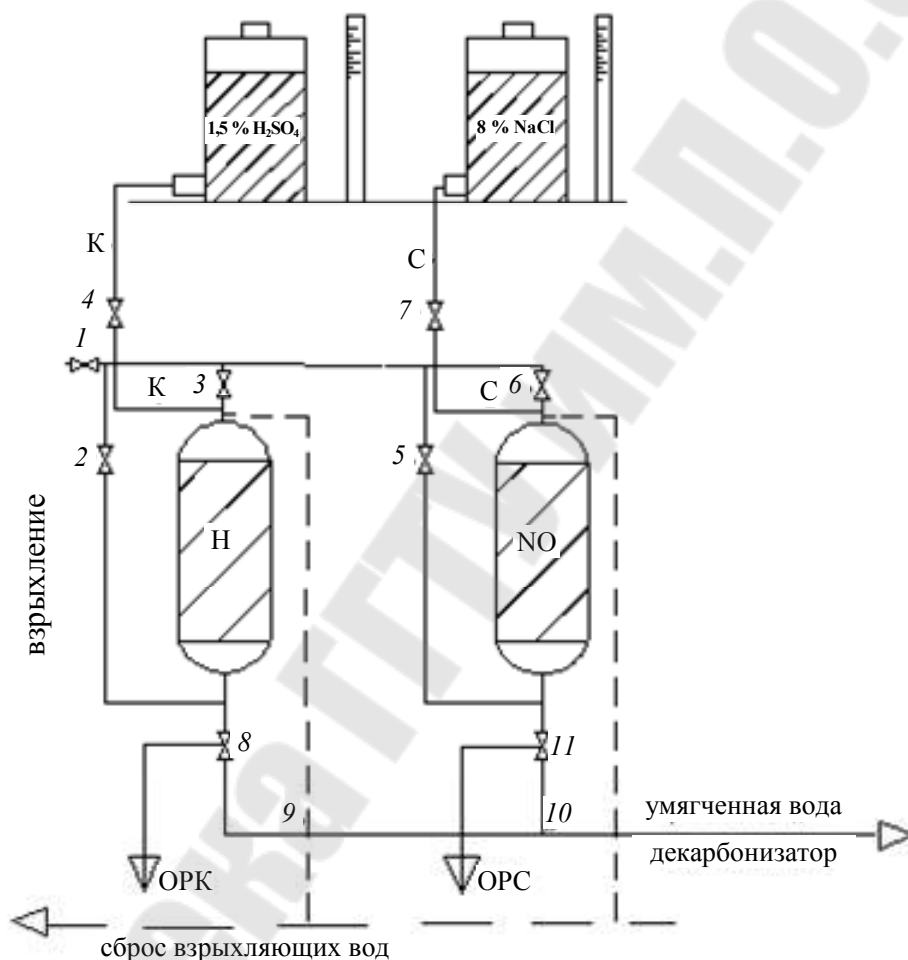


Рис. 7.2. Схема H–Na-катионирования воды:

ОРК – отработанный раствор кислоты; ОРС – отработанный раствор соли;  
-к- – 1,5%-й раствор серной кислоты; -с- – 8%-й раствор поваренной соли

Перед началом опыта определяется карбонатная, общая и некарбонатная жесткость воды.

Работа катионитного фильтра складывается из четырех операций: *взрыхления*; *регенерации*; *промывки от продуктов регенерации*; *умягчения*. Часто первые три операции объединяют общим названием – *регенерация фильтра*.

### *Взрыхление*

Взрыхление катионита в фильтре осуществляется перед каждой регенерацией током снизу вверх.

Для взрыхления фильтров используют сырую воду или же воду, собранную после отмывки.

При взрыхлении из фильтра удаляют загрязнения, попавшие в фильтр с исходной водой и регенерационным раствором, а также пыль и мелочь, образовавшиеся при разрушении катионита и мешающие работе. Кроме того, при взрыхлении обеспечивается лучшая доступность регенерационного раствора к зернам катионита, ликвидируются избирательные потоки, которые могут быть в слое катионита, улучшается гидродинамика работы фильтра.

При взрыхлении вода поступает на фильтр снизу вверх, для чего открывают краны 1, 2, 5, 9 и 10. Скорость течения воды постепенно увеличивают таким образом, чтобы весь объем катионита пришел во взвешенное состояние. Взрыхление продолжают около 10 мин (до полного осветления воды).

Количество воды, необходимое для взрыхления фильтрующего материала, подсчитывается по формуле

$$Q_{\text{взр}} = \frac{W_{\text{взр}} \cdot f \cdot t_{\text{взр}} \cdot 10^3}{60}, \text{ л}, \quad (7.1)$$

где  $W_{\text{взр}}$  – скорость при взрыхлении фильтрующего материала, равная 9 м/ч;  $t_{\text{взр}}$  – время взрыхления, равное 10 мин;  $f$  – площадь сечения катионитного фильтра, определяемая как

$$f = \frac{\pi d^2}{4}, \quad (7.2)$$

где  $d$  – диаметр фильтра, равный 0,1 м.

### *Регенерация*

По окончании взрыхления проводится регенерация фильтра раствором поваренной соли 6–8%-й концентрации. Подача раствора соли в фильтр осуществляется эжектором из бака-мерника насыщенного раствора или из бака, в котором раствор соли приготавливается заранее.

Для регенерации Н-катионита пропускают через слой 1–2%-й раствор серной кислоты из бака № 1, а для регенерации Na-катионита – 8–10%-й раствор поваренной соли из бака № 2. В первом случае открывают краны 4, 8, во втором 6, 11 и медленно пропускают регенерационный раствор сверху вниз, после чего краны 4, 8, 7, 11 закрывают.

Определение количества регенерационного раствора серной кислоты и поваренной соли на регенерацию фильтрующего материала производят следующим образом:

– объем фильтрующего материала (сульфоугля) в Н- и Na-катионитных фильтрах  $V = 800 \text{ см}^3 (0,0008 \text{ м}^3)$ ;

– количество 100%-й  $\text{H}_2\text{SO}_4$  в граммах  $G_{\text{H}_2\text{SO}_4}^{100}$  на регенерацию Н-катионитного фильтра, если на  $1 \text{ м}^3$  катионита расходуется  $20 \text{ кг/м}^3 \text{ H}_2\text{SO}_4$ ;

– расход 1%-го раствора  $\text{H}_2\text{SO}_4$  на регенерацию фильтра;

– количество 100%-го раствора  $\text{NaCl}$   $G_{\text{NaCl}}^{100}$  на регенерацию Na-катионитного фильтра при удельном расходе  $g_{\text{NaCl}} = 60 \text{ кг/мм}^3$ ;

– объем 10%-го раствора поваренной соли на регенерацию фильтра в мл.

*Отмывка от продуктов регенерации*

Эта операция имеет целью удалить из слоя катионита продукты регенерации и избыточные количества регенерационного раствора. Отмывка ведется исходной водой при скорости фильтрования  $10 \text{ м/ч}$  со сбросом отмывочной воды в дренаж. При отмывке открыты краны *1, 3, 8, 6, 11*.

Через некоторое время после начала отмывки отбирают пробы отмывочной воды и проверяют их на жесткость. С момента появления воды с жесткостью  $0,2 \text{ мг-экв/л}$  проводят определение содержания в воде хлоридов (Na-катионирование) или сульфатов (Н-катионирование).

Когда концентрация хлоридов (сульфатов) в отмывочной воде станет примерно равной концентрации в исходной воде (по интенсивности мути), отмывку заканчивают и фильтр снова может быть использован для работы.

Количество воды, необходимое для отмывки катионита от продуктов регенерации, определяется по формуле

$$Q_{\text{отм}} = \frac{W_{\text{отм}} \cdot f \cdot t_{\text{отм}} \cdot 10^3}{60}, \text{ л}, \quad (7.3)$$

где  $W_{\text{отм}}$  – скорость фильтрования при отмывке, равная  $10 \text{ м/ч}$ ;  $t_{\text{отм}}$  – время отмывки катионита, равное  $30 \text{ мин}$ .

Если фильтр ставится в резерв, то отмывку до конца проводить не следует. Окончательную отмывку фильтра нужно произвести перед пуском его в работу, сбрасывая воду в дренаж в течение  $5\text{--}10 \text{ мин}$ .

В целях экономии воды при отмывке первые 10–15 мин сбрасывать воду в дренаж, а затем собирать воду в бак и использовать ее в дальнейшем для взрыхления фильтров.

#### *Умягчение*

В процессе умягчения катионы кальция и магния, находящиеся в исходной воде, замещаются катионами натрия либо водорода, которые находятся в катионите.

Жесткость химически очищенной воды в процессе умягчения не должна быть выше 0,2 мг-экв/кг.

Температура исходной воды, поступающей на водоочистку, должна быть не ниже 20 °С (чтобы предохранить аппаратуру от запотевания) и не выше 60 °С, т. к. при такой температуре дренажные колпачки будут выходить из строя, а катионит разлагается.

Умягчаемая вода из водопроводной сети подается на фильтры сверху вниз. Регулируя степень открытия кранов 1, 3, 8, 6, 11, устанавливают скорость фильтрования порядка 10–15 м/ч (считая на свободное сечение фильтра). Умягченную воду отбирают в сосуды по 500 мл с небольшим промежутком времени между отборами. По окончании умягчения краны 1, 3, 8, 6, 11 закрывают.

Делают анализ отобранных проб воды, состоящей в определении общей жесткости и щелочности Na-катионированной воды ( $J_{Na}$ ,  $Щ_{Na}$ ), жесткости и кислотности H-катионированной воды ( $J_H$ ,  $K_H$ ).

По анализу двух проб определяют средние показатели ее качества. Определяют объем H- и Na-катионированной воды для получения 1 л смеси с заданной остаточной щелочностью (0,4 мг-экв./л) по формулам:

$$V_H = X1000, \text{ мл}$$

$$V_{Na} = (1 - X)1000, \text{ мл},$$

где  $X$  – доля H-катионированной воды, которая определяется по формуле

$$X = \frac{J_k - Щ_{ост}}{J_0},$$

$(1 - X)$  – доля Na-катионированной воды в смеси, которая определяется по формуле

$$(1 - X) = \frac{J_{нк} - Щ_{ост}}{J_0}.$$

Жесткость смешанной воды определяется по формуле

$$Ж_{см} = XЖ_{к} + (1 - X)Ж_{нк}, \text{ мг-экв/л.}$$

Результаты вычислений сводятся в табл. 7.1 и 7.2.

Таблица 7.1

Результаты анализов исходной умягченной воды, мг-экв/л

Параметр	Н-катионирование				Na-катионирование			
	Исходная вода	Умягченная вода			Исходная вода	Умягченная вода		
		Проба 1	Проба 2	Сред.		Проба 1	Проба 2	Сред.
$Ж_{к}$								
$Ж_{нк}$								
$Ж_{о}$								

Таблица 7.2

Умягченная вода с заданной щелочностью  $Щ_{ост}$ , мг-экв/л

Н-катионированная вода		Na-катионированная вода		Смешанная вода			
Доля в смеси $X$	Объем в 1 л смеси в мл	Доля в смеси $(1 - X)$	Объем в 1 л смеси в мл	Щелочность, мг-экв/л		Жесткость, мг-экв/л	
				заданная	по анализу	по расчету	по анализу

### Контрольные вопросы

1. В чем состоит сущность метода ионного обмена?
2. Каковы основные элементы катионитных фильтров?
3. Как осуществляется Н–Na-катионирование?
4. Какие операции осуществляются на катионитных фильтрах?



## Лабораторная работа № 8 Химическое обессоливание воды на ионитных фильтрах

**Цель работы:** закрепить теоретические знания по химическому обессоливанию воды. Определить жесткость, щелочность и содержание водопроводной воды. Провести необходимые расчеты для оценки качества обессоливания.

### Теоретическая часть

Схема лабораторной установки (рис. 8.1) для химического обессоливания воды состоит из четырех стеклянных фильтров диаметром 40 мм и декарбонизатора диаметром 60 мм. Фильтры включены по схеме двухступенчатого химического обессоливания:

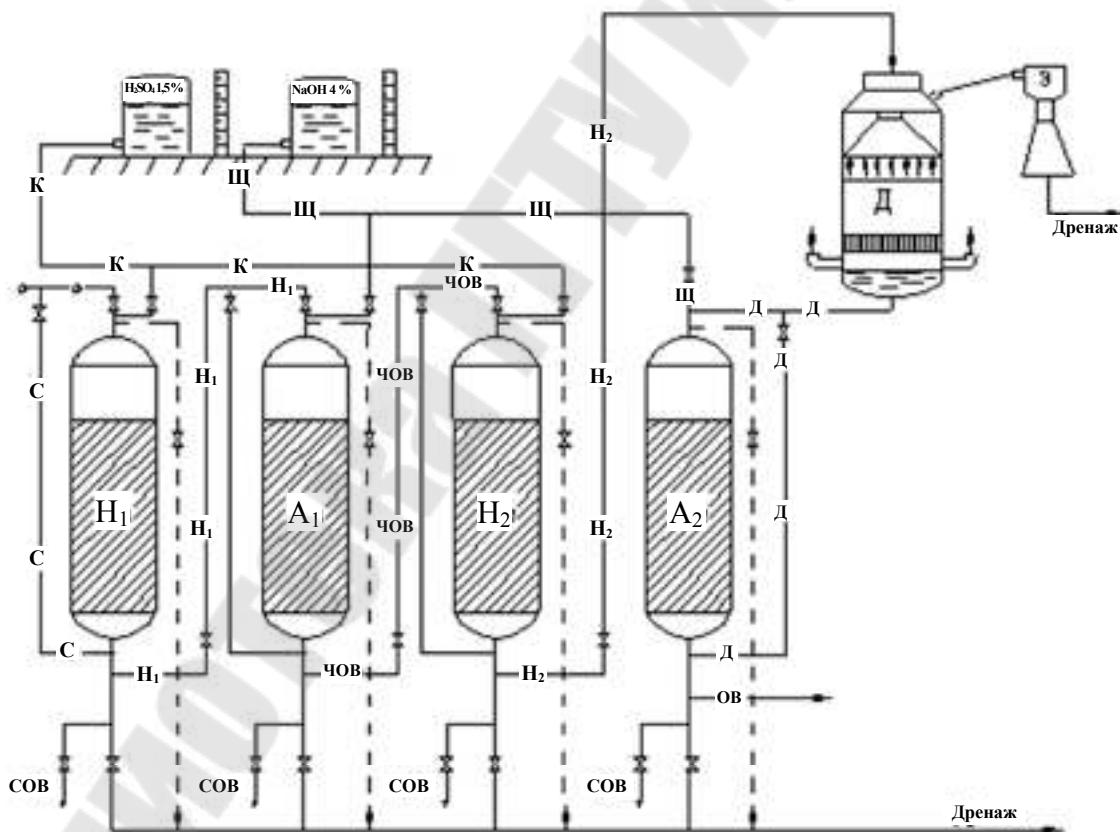


Рис. 8.1. Схема двухступенчатого химического обессоливания воды:

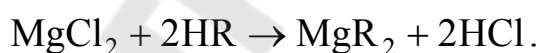
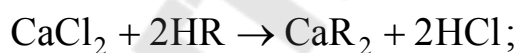
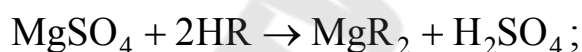
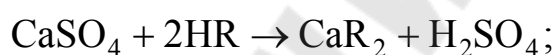
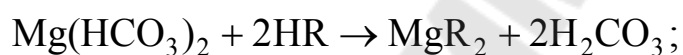
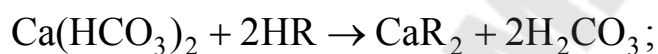
- Д – декарбонизатор; Э – эжектор; сов – сброс отмывочных вод;
- о- – вода после предочистки; -ов- – обессоленная вода;
- д- – декарбонизированная вода; -к- – раствор кислоты;
- щ- – раствор щелочи; -чов- – частично обессоленная

Соединение фильтров осуществлено стеклянными трубками диаметром 8–10 мм. Водород-катионитные фильтры заполнены сульфугоглем, анионитный фильтр I ступени – анионитом АН-31, анионитный фильтр II ступени – анионитом АВ-17-8. Регулирование количества поступающей на установку воды осуществляется краном водопроводной линии, движение воздуха через декарбонизатор создается водоструйным эжектором.

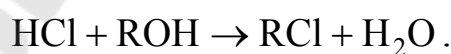
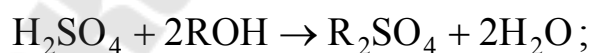
Сульфуголь отрегенирован 1–2%-м раствором  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , аниониты – 4%-м раствором  $\text{NaOH}$ .

Опыт химического обессоливания воды состоит из следующих процессов:

1. Фильтрация воды через Н-катионированный фильтр I ступени для обмена катионов  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Na}^+$  на катион  $\text{H}^+$ :



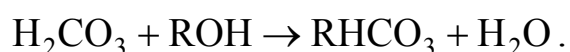
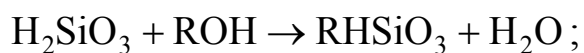
2. Фильтрация через слабоосновный анионитный фильтр для обмена анионов  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  на анион  $\text{OH}^-$ :



3. Фильтрация через Н-катионитный фильтр II ступени для обмена на катион водорода всех катионов, случайно «проскочивших» через Н-катионитный фильтр I ступени или попавших в фильтрат из фильтров со слабоосновным анионитом вследствие его старения или недостаточно хорошей отмывки после регенерации.

4. Удаление свободной углекислоты из фильтра Н-катионитных фильтров II ступени, осуществляемое при помощи декарбонизатора. Угольная кислота, хорошо поглощаемая сильноосновным анионитом, уменьшает его кремнеемкость.

5. Фильтрация воды через сильноосновный анионитный фильтр для обмена на анион  $\text{OH}^-$  аниона кремниевой кислоты. Одновременно происходит поглощение остатков свободной угольной кислоты после декарбонизации, а также незначительного проскока анионов сильных кислот через анионитный фильтр I ступени:



Химический контроль за эффективностью химического обессоливания воды состоит в определении общей жесткости, щелочности и солесодержания воды до и после ее химического обессоливания.

### ***Порядок проведения эксперимента***

Перед началом работы определяется общая жесткость, щелочность и солесодержание водопроводной воды.

Открытием крана на водопроводной линии и стеклянных кранов до фильтров и после вода последовательно пропускается через все элементы установки. Отбирают пробы обессоленной воды после анионного фильтра II ступени и определяют в них жесткость, щелочность и солесодержание. Оценивают качество обессоливания.

*Таблица 8.1*

### **Результаты работы**

<b>Наименование показателей</b>	<b>Исходная вода</b>	<b>Обессоленная вода</b>
Жесткость, мг-экв./л		
Щелочность, мг-экв./л		
Солесодержание, мг/л		

### ***Контрольные вопросы и задания***

1. Опишите химические процессы, происходящие при H-катионировании.
2. Какие химические процессы происходят при анионировании?
3. Дайте описание схемы двухступенчатого химического обессоливания воды.

## Литература

1. Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых и водогрейных котлов (ПУБЭ М 0.00.1.08–96). – Минск : БОИМ, 1997.

2. Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых котлов с давлением пара не более 0,07 МПа (0,7 кгс/см<sup>2</sup>) и водогрейных котлов с температурой нагрева воды не свыше 388 К (115 °С) (ПБ-11-01–2000). – Минск : УП «ДИЭКОС», 2000.

3. Дойников, В. Б. В помощь персоналу по организации водного режима котлов и очистки их от накипи (в вопросах и ответах) / В. Б. Дойников, Ю. П. Прохнич. – Минск : БОИМ, 2001. – 186 с.

4. Лифшиц, О. В. Справочник по водоподготовке котельных установок / О. В. Лифшиц. – 2-е изд. – Минск : Энергия, 1976.

5. Кострикин, Ю. М. Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления : справочник / Ю. М. Кострикин, Н. А. Мещерский, О. В. Коровина. – М. : Энергоиздат, 1990. – 254 с. : ил.

6. Белан, Ф. И. Водоподготовка / Ф. И. Белан. – М. : Энергия, 1979.

## Приложение

Таблица П.1.1

### Предельные значения солесодержания котловой воды для промышленных котельных установок

Тип котла	Давление, МПа	Солесодержание, мг/кг		
		без ступенчатого испарения		при ступенчатом испарении (в солевом отсеке)
		с пароперегревателем	без пароперегревателя	
ДКВР	1,37	1500	3000	6000...10000*
ГМ-50-14/250	1,37	—	—	7350
БГМ-35М/440	3,92	—	—	5000
ГМ-50-1	3,92	—	—	5000
БКЗ-75-36	3,92	—	—	3000
ДЕ и КЕ	1,37	—	3000	—

*Примечание.* Больше значение относится к котлам с выносными циклонами.

Таблица П.1.2

### Нормы качества питательной воды для промышленных котельных установок

Нормируемый показатель	Давление, МПа			Примечание
	до 1,4	до 2,4	до 4,0	
Общая жесткость, мкг-экв/л	20/15	15/10	10/5	В числителе указаны значения для котлов, работающих на твердом топливе с локальными тепловыми нагрузками поверхностей нагрева до 300 кВт/м <sup>2</sup> , в знаменателе — для котлов, работающих на газообразном, жидком и твердом топливе с локальными нагрузками более 300 кВт/м <sup>2</sup>
Взвешенные вещества, мг/кг	5	5	не допускается	
Соединения железа, мкг/кг	не нормируется/300	200/100	100/50	
Растворенный кислород, мкг/кг	50/30	50/20	30/20	
Свободная углекислота, мкг/кг	не допускается	не допускается	не допускается	
Содержание СО <sub>2</sub> , мкг/кг	не нормируется	не нормируется	20	
Содержание масел, мкг/кг	3	3	0,5	
Значение pH при t = 25 °С	8,5...9,5	8,5...9,5	—	

Таблица П.1.3

**Предельные нормы качества питательной воды  
энергетических барабанных котлов**

Нормируемый показатель	Давление, МПа			Примечание
	до 4,0	4,0...10,0	выше 10,0	
Общая жесткость, мкг-экв/кг	5	3	1	на жидком топливе; на других видах топлива
	10	5	1	
Содержание кремния (в пересчете на SiO <sub>2</sub> ), мг/кг	–	70	40	ГРЭС и отопительные ТЭЦ; ТЭЦ с производственным отбором пара
	–	по данным испытаний	120	
Содержание кислорода, мкг/кг	20	20	10	–
Содержание соединений железа, мкг/кг	100	50	20	на жидком топливе; на других видах топлива
	200	100	30	
Содержание соединений меди, мкг/кг	10	10	5	на жидком топливе; на других видах топлива
	20	20	5	
Содержание масел, мкг/кг	1	0,3	0,3	–
Содержание СО <sub>2</sub> , мкг/кг	отсутствует	отсутствует	отсутствует	–
Содержание аммиака, мкг/кг	1000	1000	1000	–
Значение <i>pH</i> при <i>t</i> = 25 °С	9,1±0,1	9,1±0,1	9,1±0,1	–

Таблица П.1.4

**Предельные нормы качества питательной воды прямоточных котлов  
сверхкритических параметров**

Нормируемый показатель	Численное значение	Нормируемый показатель	Численное значение
Жесткость общая, мкг-экв/кг	0,2	Растворенный кислород	10
Соединения натрия в пересчете на Na, мкг/кг	5	Кремниевая кислота, мкг/кг	15

Окончание табл. П.1.4

Нормируемый показатель	Численное значение	Нормируемый показатель	Численное значение
Соединения железа в пересчете на Fe, мкг/кг	10	Значение $pH$ при $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	6,9...(9,1±0,1) (в зависимости от водного режима)
Соединения меди в пересчете на Cu, мкг/кг	5	Масло	следы

Таблица П.1.5

### Нормы качества воды для подпитки тепловых сетей

Нормируемый показатель	Содержание при подогреве воды, $^{\circ}\text{C}$		
	до 75	75...150	151...200
Остаточная общая жесткость при использовании продувочной воды (в закрытых системах теплоснабжения), мг-экв/кг	–	0,05	0,05
Карбонатная жесткость, мг-экв/кг	1,5	0,7	0,4
Свободная углекислота, мг/кг	отсутствует	отсутствует	–
Взвешенные вещества, мг/кг	5	5	5
Растворенный кислород, мг/кг	0,1	0,05	0,03
Значение $pH$ при $t = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$	6,5...8,5	6,5...8,5	–
Масло, мг/кг	1	1	1

*Примечание.* При открытой системе теплоснабжения в сетях для горячего водоснабжения, кроме указанных требований, к воде предъявляются требования ГОСТ 2874–82 «Вода питьевая».

## Содержание

Общие указания по выполнению и оформлению лабораторных работ .....	3
<i>Лабораторная работа № 1. Определение сухого остатка воды .....</i>	<i>4</i>
<i>Лабораторная работа № 2. Определение водородного показателя (рН) воды .....</i>	<i>7</i>
<i>Лабораторная работа № 3. Определение щелочности воды.....</i>	<i>10</i>
<i>Лабораторная работа № 4. Определение жесткости воды.....</i>	<i>13</i>
<i>Лабораторная работа № 5. Удаление из воды коллоидных примесей методом коагуляции.....</i>	<i>19</i>
<i>Лабораторная работа № 6. Умягчение воды методом осаждения накипеобразователей.....</i>	<i>23</i>
<i>Лабораторная работа № 7. Умягчение воды методом катионного обмена.....</i>	<i>27</i>
<i>Лабораторная работа № 8. Химическое обессоливание воды на ионитных фильтрах .....</i>	<i>33</i>
Литература .....	36
Приложение .....	37



Учебное электронное издание комбинированного распространения

Учебное издание

**Овсянник** Наталья Владимировна  
**Волкова** Екатерина Николаевна  
**Трошев** Дмитрий Сергеевич

## **ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНЫЙ РЕЖИМ КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК**

**Лабораторный практикум  
по одноименному курсу для студентов  
специальностей 1-43 01 05 «Промышленная  
теплоэнергетика» и 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация  
энергооборудования организаций»  
дневной и заочной форм обучения**

**Электронный аналог печатного издания**

Редактор *А. В. Власов*  
Компьютерная верстка *М. В. Аникеенко*

Подписано в печать 01.07.11.

Формат 60x84/16. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».

Ризография. Усл. печ. л. 2,56. Уч.-изд. л. 2,5.

Изд. № 102.

E-mail: [ic@gstu.by](mailto:ic@gstu.by)

<http://www.gstu.by>

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Издательский центр учреждения образования  
«Гомельский государственный технический университет  
имени П. О. Сухого».

ЛИ № 02330/0549424 от 08.04.2009 г.

246746, г. Гомель, пр. Октября, 48.