

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

М.Н. КОТЛЯР, Л.А. НИКОЛАЕВА

ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЕ  
РЕЖИМЫ НА ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Казань 2019

УДК 621.311.22

ББК 31.37

К73

*Рецензенты:*

канд. техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «КНИТУ» *М.Е. Зиновьева*;

д-р техн. наук, доцент ФГБОУ ВО «КНИТУ» *И.Г. Шахиев*

**К73      Котляр М.Н., Николаева Л.А.**

Водоподготовка и водно-химические режимы на теплоэнергетических объектах: учеб. пособие / М.Н. Котляр, Л.А. Николаева. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2019. – 184 с.

В учебном пособии изложены теоретические основы физико-химических процессов, протекающих в пароводяном цикле тепловых электростанций при различных водно-химических режимах, физико-химические основы процессов, происходящих при подготовке воды.

Рассмотрено влияние коррекционной обработки питательной и котловой воды на состав и структуру отложений в паровых котлах и проточной части турбин.

Приведены методы расчёта аппаратов, схем водоподготовительных установок и рекомендации по их эксплуатации, в приложении приведён физико-химический расчёт стадии предочистки водоподготовительной установки.

Пособие предназначено для обучающихся по направлению подготовки 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника».

УДК 621.311.22

ББК 31.37

©. Котляр М.Н., Николаева Л.А 2019

© Казанский государственный энергетический университет, 2019

## ВВЕДЕНИЕ

Водно-химический режим электростанции должен обеспечивать работу основного и вспомогательного теплоэнергетического оборудования без повреждения, снижения экономичности, вызванных образованиями:

- накипи и отложений на теплопередающих поверхностях, в том числе на трубках конденсаторов турбин;
- шлама в оборудовании и трубопроводах электростанции и в тепловых сетях;
- отложений в проточной части турбин;
- продуктов коррозии внутренних поверхностей теплового оборудования и тепловых сетей.

Одним из путей улучшения технико-экономических показателей работы станции является оптимизация её водно-химического режима. Основные требования к организации водного режима тепловых электростанций зафиксированы в нормах ПТЭ.

Помимо примесей, поступающих в цикл электростанций извне (с добавочной водой, присосами охлаждающей воды), вода и пар загрязняются также продуктами коррозии конструкционных материалов, из которых изготовлены поверхности, соприкасающиеся с рабочими веществами. В качестве конструкционных материалов на тепловых электростанциях применяют стали перлитного класса, углеродистые, слаболегированные. Относительная низкая стоимость и простая технология изготовления этих сталей являются их большим преимуществом. Однако эти стали обладают невысокой коррозионной стойкостью. Трубопроводы конденсатно-питательного тракта и добавочной воды изготавливают из углеродистой стали. В качестве конструкционного материала в парогенераторах используют жаропрочные, хромомолибденовые стали перлитного класса следующих марок: 12×1НФ, 12×2НФСД и др. Для турбины основным конструкционным материалом являются хромистые стали, медные сплавы (в основном «латуни»). Эти материалы обладают высокой теплопроводностью, поэтому могут применяться для изготовления трубок конденсатора. Стали загрязняют воду и пар продуктами коррозии, содержащими в своём составе Fe, Cr, Mo, Ni, V и другие элементы. Латунь даёт продукты коррозии, содержащие Cu и Zn, а также Sn, Al, Ni. Для энергоблоков нормирование водного режима сводится к установлению норм качества пара, питательной воды, котловой воды.

Для обеспечения водно-химического режима необходимо проводить следующие мероприятия:

1) противокоррозионная обработка котловой воды с целью предотвращения образования отложений и накипи на греющих поверхностях котла;

2) гидразинно-аммиачная обработка воды в пароводяном тракте для обеспечения минимальной скорости коррозии конструкционных материалов;

3) вывод образовавшихся в конденсатно-питательном тракте примесей с непрерывной продувкой котла;

4) консервация оборудования при останове в резерв или ремонт;

5) проведения периодических эксплуатационных очисток оборудования от накипи и отложений;

6) организация химического контроля за качеством воды и пара.

Изменения температуры и давления воды, сопровождающиеся изменением теплофизических и физико-химических свойств пара и воды, обуславливают особенности поведения примесей на разных участках пароводяного тракта тепловой электрической станции (ТЭС). Примеси, образующиеся на поверхностях, соприкасающихся с паром и водой, содержат соли  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  и свободную  $\text{H}_2\text{SiO}_3$ . Из опыта эксплуатации ТЭС известно, что солевые отложения в больших или в меньших количествах могут образовываться на поверхностях нагрева котлов, в пароперегревателях, на лопатках турбин, а также на трубках конденсаторов со стороны охлаждения воды, трудно удаляемые отложения кремнекислоты образуются в проточной части турбин. Отсутствие кислорода и углекислого газа приводят к уменьшению образования отложений, содержащих оксиды  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ . Такого вида отложения встречаются в котлах, пароперегревателях, турбинах, подогревателях высокого давления (ПВД) и другой теплообменной аппаратуре.

В процессе освоения материала учебного пособия студент формирует и демонстрирует следующие компетенции:

- способность к обобщению, анализу, восприятию информации, постановке цели и выбору путей ее достижения;

- способность демонстрировать базовые знания в области естественно-научных дисциплин и использовать основные законы в профессиональной деятельности;

- способность проводить расчеты по типовым методикам и проектировать отдельные детали и узлы с использованием стандартных средств проектирования в соответствии с заданием;

- способность к организации рабочих мест в соответствии с технологией производства, нормами техники безопасности;
- готовность к контролю соблюдения технологической дисциплины на производственных участках;
- владеть основными методами, способами и средствами получения, хранения, переработки информации, использовать компьютер как средство работы с информацией;
- способность и готовность использовать информационные технологии, в том числе современные средства компьютерной графики в своей предметной области;
- способность и готовность анализировать научно-техническую информацию, изучать отечественный и зарубежный опыт по тематике исследования;
- готовность к контролю соблюдения экологической безопасности на производстве, к участию в разработке и осуществлении экозащитных мероприятий и мероприятий по энерго- и ресурсосбережению на производстве.

В результате освоения материала, обучающийся должен демонстрировать следующие результаты образования:

*знать:*

- основные водно-химические режимы при эксплуатации водоподготовительного оборудования; требования и порядок соблюдения водно-химических режимов при эксплуатации водоподготовительного оборудования; методику выбора оптимального водно-химического режима при эксплуатации оборудования;

*уметь:*

- определять и рассчитывать основные технологические и физико-химические показатели качества природных вод;
- составлять уравнения механизмов воднохимических режимов ТЭС и АЭС.
- применять приемы и методы для проведения воднохимического режимы на ТЭС и АЭС;

*владеть:*

- навыками проведения физико-химических и технологических расчетов изменения показателей качества воды по ступеням обработки программными продуктами расчета, а также программами, осуществляющими динамическое моделирование физико-химических процессов обработки природных вод.

## ГЛАВА 1. ПРИМЕСИ ПРИРОДНЫХ ВОД. ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА ВОДЫ

### 1.1. Типичная схема обращения воды в циклах тепловых электрических станциях (ТЭС)

В настоящее время вода широко используется в различных областях промышленности в качестве теплоносителя, чему способствуют широкое распространение воды в природе и её особые термодинамические свойства, связанные со строением молекул. Полярность молекул воды, характеризующаяся дипольным моментом, определяет большую энергию взаимного притяжения молекул воды и соответственно большую теплоту фазового перехода при парообразовании, высокие теплоемкость и теплопроводность. Значение диэлектрической постоянной воды, также зависящей от дипольного момента, определяет своеобразие свойств воды как растворителя.

Основным хранилищем воды на Земле являются океаны, в которых сосредоточено более 98 % всего количества воды. Океанская вода содержит до 35 г/кг растворённых солей, главным образом, ионов натрия и хлора. На долю вод с солесодержанием менее 1 г/кг (пресных вод) приходится лишь 1,7 %, причем в речных водах находится около 0,001 % всех пресных вод, а основная масса сосредоточена в ледниках. Природная вода не может без очистки (обработки) являться теплоносителем в теплоэнергетических установках, поскольку современные ТЭС и атомные электрические станции (АЭС) в энергетическом цикле используют воду высокого качества с содержанием примесей в пределах 0,1–1,0 мг/дм<sup>3</sup>.

Оборудование современных ТЭС и АЭС эксплуатируется при высоких тепловых нагрузках, что требует жесткого ограничения толщины отложений на поверхностях нагрева по условиям температурного режима их металла в течение рабочей кампании. Такие отложения образуются из примесей, поступающих в циклы электростанций, в том числе и с добавочной водой, поэтому обеспечение высокого качества водных теплоносителей ТЭС и АЭС является важнейшей задачей. Использование водного теплоносителя высокого качества упрощает решение задач получения чистого пара, минимизации скоростей коррозии конструкционных металлов котлов, турбин и оборудования конденсатно-питательного тракта. Таким образом, качество обработки воды на ТЭС и АЭС тесным образом связано с надёжностью и экономичностью эксплуатации современного высокоинтенсивного котлотурбинного оборудования, с безопасностью ядерных энергетических установок.

Для соблюдения норм качества воды, потребляемой при выработке электрической и тепловой энергии, необходимо проводить специальную физико-химическую обработку природной воды. Эта вода является, по существу, исходным сырьем, которое после надлежащей обработки (очистки) используется для следующих целей:

- 1) в качестве исходного сырья для получения пара в котлах, парогенераторах, ядерных реакторах кипящего типа, испарителях, паропреобразователях;
- 2) для конденсации отработавшего в паровых турбинах пара;
- 3) для охлаждения различных аппаратов и агрегатов ТЭС и АЭС;
- 4) в качестве теплоносителя в тепловых сетях и системах горячего водоснабжения.

Типичная схема обращения воды в рабочих циклах теплоэлектростанций (ТЭС) приведена на рис. 1.1 [1].

*Исходная природная вода* ( $D_{исх}$ ) используется в качестве исходного сырья на водоподготовительной установке (ВПУ), а также для других целей на ТЭС и АЭС.

*Добавочная вода* ( $D_{д.в}$ ) направляется в контур для восполнения потерь пара и конденсата после обработки с применением физико-химических методов очистки.

*Турбинный конденсат* ( $D_{т.к}$ ), содержащий незначительное количество растворимых и взвешенных примесей, – основная составляющая питательной воды.

*Возвратный конденсат* ( $D_{в.к}$ ) от внешних потребителей пара используется после очистки от внесенных загрязнений. Он является составной частью питательной воды.

*Питательная вода* ( $D_{п.в}$ ), подаваемая в котлы, парогенераторы или реакторы для замещения испарившейся воды в этих агрегатах, представляет собой, главным образом, смесь турбинного конденсата, добавочной воды, возвратного конденсата и конденсата в элементах указанных агрегатов.

*Продувочная вода* ( $D_{пр}$ ) выводимая из котла, парогенератора или реактора вода, поступающая на очистку или в дренаж для поддержания в испаряемой (котловой) воде заданной концентрации примесей. Состав и концентрация примесей в котловой и продувочной водах одинаковы.

*Охлаждающая или циркуляционная вода* ( $D_{о.в}$ ) используется в конденсаторах паровых турбин для конденсации отработавшего пара.

*Подпиточная вода* ( $D_{п.в}$ ) подается в тепловые сети для восполнения потерь циркулирующей в них воды.

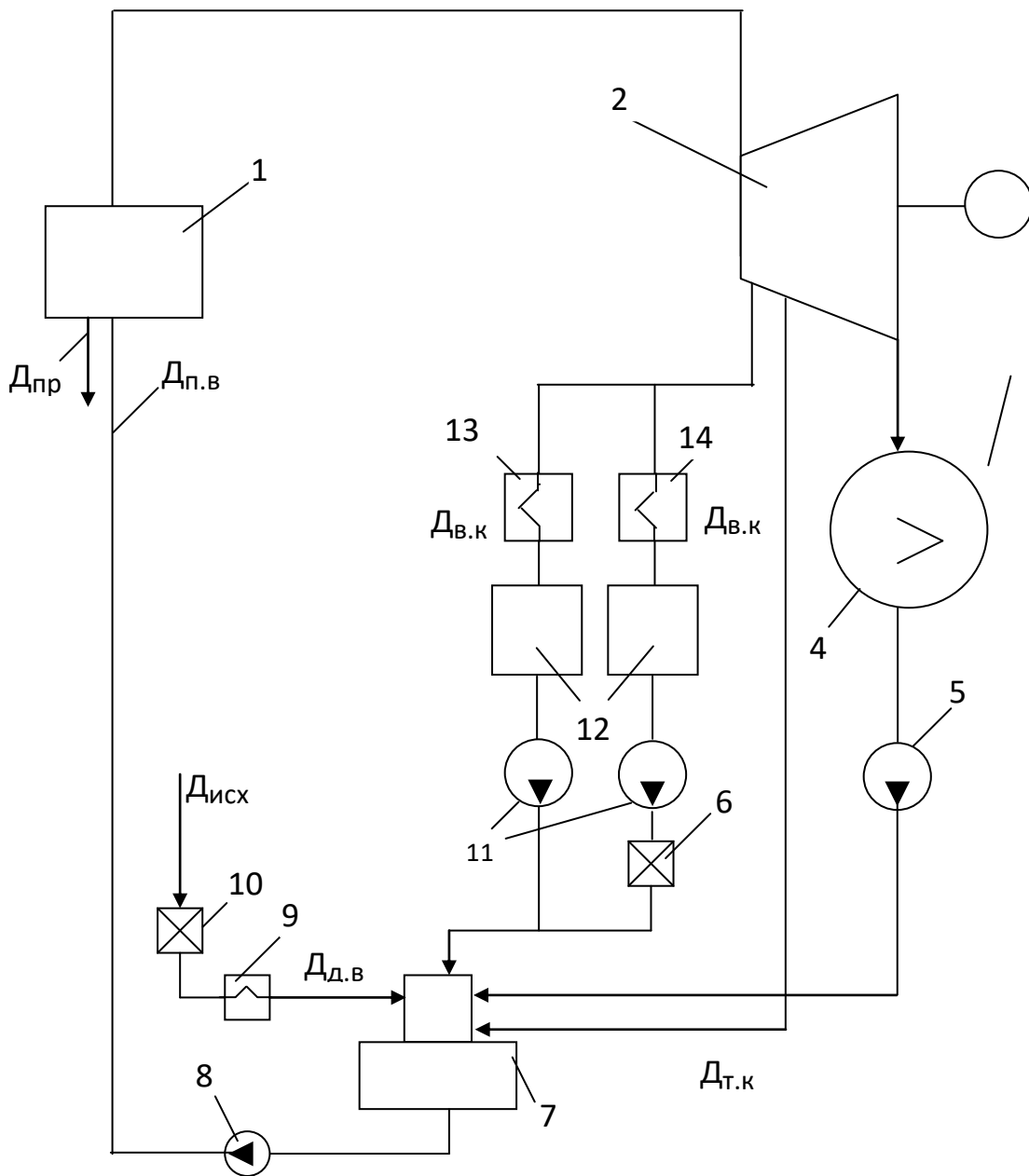


Рис. 1.1. Принципиальная схема обращения воды в тракте ТЭЦ: 1 – котёл; 2 – турбина с отборами пара для нужд производства и теплофикации; 3 – электрогенератор; 4 – конденсатор; 5 – конденсатный насос; 6 – установка очистки возвратного производственного конденсата; 7 – деаэратор ; 8 – питательный насос; 9 – подогреватель добавочной воды; 10 – водоподготовительная установка (ВПУ); 11 – насосы возвратного конденсата; 12 – баки возвратного конденсата; 13 – теплофикационный потребитель пара; 14 – производственный потребитель пара



## 1.2. Классификация примесей природных вод

Для водоснабжения энергообъектов используются в большинстве случаев природные воды как поверхностные (из рек, озер, прудов), так и подземные (из артезианских скважин). В последние годы в связи с дефицитом воды в отдельных регионах и более строгими требованиями к охране водоёмов энергообъекты используют также воду циркуляционных систем предприятий, а также малозагрязненные сточные воды. Все воды содержат разнообразные примеси, попадающие в воду в процессе ее естественного круговорота в природе; кроме того, возможно загрязнение водоисточников бытовыми и промышленными стоками.

Природные воды классифицируют по ряду признаков, простейший из которых – солесодержание воды: пресная вода с солесодержанием до  $1 \text{ г/дм}^3$ ; солоноватая –  $1\text{--}10 \text{ г/дм}^3$ ; соленая – более  $10 \text{ г/дм}^3$ . В речных и подземных водах солесодержание изменяется от  $50\text{--}200$  до  $1500\text{--}2000 \text{ мг/дм}^3$ . Наибольшее количество растворенных примесей содержат воды океанов и морей,  $\text{г/дм}^3$ : Балтийское море – 11, Каспийское – 13, Черное – 19, Атлантический океан – 36.

Большое распространение получила предложенная О.А. Алекиным система, по которой воды различаются по преобладающему в них аниону: гидрокарбонатный класс вод с преобладающим анионом  $\text{HCO}_3^-$ , карбонатные воды с преобладающим анионом  $\text{CO}_3^{2-}$ , сульфатные воды –  $\text{SO}_4^{2-}$ , хлоридные воды –  $\text{Cl}^-$ . По преобладающему катиону классы природных вод делятся на три группы: кальцевую –  $\text{Ca}^{2+}$ , магниевую –  $\text{Mg}^{2+}$  и натриевую –  $\text{Na}^+$ . Группы в свою очередь подразделяются на типы, учитывающие соотношения между ионами,  $\text{мг-экв/дм}^3$ . Реки средней полосы европейской части России в основном относятся к гидрокарбонатному классу кальциевой группы.

По химическому составу примеси природных вод можно разделить на два типа: минеральные и органические.

К минеральным примесям воды относятся растворенные в ней содержащиеся в атмосфере газы  $\text{N}_2$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , образующиеся в окислительных и биохимических процессах газы  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ , а также газы, вносимые сточными водами; различные соли, кислоты, основания, в значительной степени находящиеся в диссоциированной форме, т.е. в виде образующих их катионов и анионов.

К органическим примесям природных вод относят гумусовые вещества, вымываемые из почв и торфяников, а также органические вещества различных типов, поступающие в воду совместно со сточными водами промышленных предприятий.

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 растворённом состоянии в воде находятся газы ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$ ,  $N_2$ ), а также катионы и анионы поступающих 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  $10^{-4}$  мм. Это растительные остатки, частицы песка, глины и т.д.

Содержание грубодисперсных примесей в природных водах различно в разное время года: для равнинных рек максимальное содержание наблюдается в период паводка (таяния снегов), для горных рек – в паводок и в периоды ливней в горах. Для оценки качества природных вод и вод энергообъектов на различных стадиях технологического процесса приняты ниже перечисленные показатели. Их определяют в отфильтрованных пробах, и только один показатель – **взвешенные вещества** – определяют непосредственно в отобранной пробе, пользуясь весовым методом. Используемую воду фильтруют через предварительно высушенный и взвешенный беззольный бумажный фильтр. По окончании фильтрования фильтр с задержанными грубодисперсными частицами вновь высушивают при температуре  $105\text{ }^\circ\text{C}$  до постоянной массы. Прирост масс выражают в  $\text{мг/дм}^3$ .

### 1.3. Физико-химические и технологические показатели качества воды

Показатели, необходимые для характеристики качества воды, определяются характером использования воды различными потребителями. Например, качество воды хозяйственно-питьевого назначения характеризуют

с помощью показателей, не принимаемых во внимание при использовании воды на ТЭС и АЭС. В этом разделе рассматриваются основные показатели, используемые при анализе природных вод, применяемых в теплоэнергетике в качестве теплоносителя.

Минеральные примеси различных природных вод по количественному составу примерно постоянны и отличаются лишь концентрациями, установление которых и входит в задачу анализа природных вод. Важнейшие показатели качества воды, определяющие применимость её для паротурбинных установок и метод её обработки – концентрация грубодисперсных примесей (взвешенные вещества), концентрация ионов  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ , pH воды, удельная электропроводность, технологические показатели (сухой прокаленный остаток, щелочность, жесткость, кремнесодержание, окисляемость), концентрация растворённых газов  $\text{O}_2$  и  $\text{CO}_2$ .

**Содержание грубодисперсных (взвешенных) веществ** выражают в  $\text{мг/дм}^3$  и определяют фильтрованием 1 л пробы воды через бумажный фильтр, который затем высушивают при температуре 105–110 °С до постоянной массы.

**Прозрачность воды** определяют с помощью методов шрифта и креста. Для первого способа применяют градуированный на сантиметры стеклянный цилиндр высотой 30 см, на дно которого положен определённый шрифт. Столб воды в сантиметрах, через который ещё можно прочесть текст, и определяет прозрачность воды. Прозрачность по кресту определяют по той же методике, используя трубку длиной 350 см, диаметром 3,0 см, на дно которой помещают бумажный круг с крестом, имеющим ширину линий в 1 мм.

**Мутность** воды пропорциональна содержанию в ней взвешенных частиц, её определяют, сравнивая анализируемую пробу с определённым эталоном мутности.

**Удельная электропроводность** растворов  $\chi$ , характеризуемая электропроводностью  $1 \text{ см}^3$  жидкости с размером граней 1 см и выражаемая в См/см, является важным показателем качества природной и обрабатываемой воды, указывающим на суммарную концентрацию ионногенных примесей. Удельная электропроводность воды, не содержащей примесей, при 25 °С составляет 0,063 мкСм/см и определяется переносом в электрическом поле только ионов  $\text{H}^+$  и  $\text{OH}^-$ . При постоянной температуре и данной степени диссоциации существует прямая зависимость между концентрацией электролита и его удельной электропроводностью.

Так, удельную электропроводность водных растворов различных солей концентрацией  $500 \text{ мкг/дм}^3$  в условном пересчете на NaCl можно оценить из соотношения:

$$1 \text{ мкСм/см} \approx 0,5 \text{ мг NaCl/дм}^3 \text{ H}_2\text{O}.$$

**Сухой остаток** CO ( $\text{мг/дм}^3$ ) определяют путем выпаривания определенного объема предварительно профильтрованной пробы и последующего просушивания остатка при температуре  $110\text{--}120 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Сухой остаток выражает содержание растворенных в воде минеральных и органических примесей, нелетучих при указанной температуре. Содержащиеся в природной воде  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$  и  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$  при выпаривании разлагаются с выделением  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CO}_2$ , и в сухом остатке появляются  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{MgCO}_3$ ; это надо иметь в виду, сравнивая сухой остаток с минеральным.

**Плотный осадок** определяют, подсушивая при  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  упаренный остаток нефильтрованной воды, содержащий также и грубодисперсные примеси, концентрацию которых можно найти по разности плотного и сухого остатков воды.

**Минеральный остаток** ( $\text{мг/дм}^3$ ) (общее солесодержание) подсчитывается путем суммирования концентраций катионов и анионов, определенных при проведении полного химического анализа воды.

**Прокаленный остаток** ( $\text{мг/дм}^3$ ) характеризует содержание в воде минеральных веществ; его определяют путем прокаливания при  $800 \text{ }^\circ\text{C}$  сухого остатка. При прокаливании сгорают органические вещества, и частично разлагаются карбонаты.

**Окисляемость воды** – это показатель, имеющий условное значение и представляющий собой расход какого-либо сильного окислителя, необходимого для окисления в определённых условиях природных органических примесей, которые содержатся в  $1 \text{ дм}^3$  воды. Обычно для этих целей применяют перманганат калия ( $\text{KMnO}_4$ ) или бихромат калия ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ), различают соответственно перманганатную и бихроматную окисляемость. Окисляемость воды выражают в кислородных или перманганатных единицах ( $\text{мгO}_2/\text{дм}^3$ ,  $\text{мгKMnO}_4/\text{дм}^3$ ), различающихся в 3,95 раза. Бихроматная окисляемость обычно превышает в 2–2,5 раза перманганатную, а разность между ними позволяет судить об устойчивости органических примесей к действию окислителей. При определении окисляемости обоих видов происходит окисление не только содержащихся

в воде органических веществ, но и некоторых неорганических, например: закисного железа, сероводорода, нитритов. Поэтому следует еще раз подчеркнуть, что окисляемость характеризует содержание в воде органических веществ лишь приближенно и условно [1].

Окисляемость чистых грунтовых вод составляет обычно  $1-3 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$ , в то время как в водах поверхностных источников окисляемость повышается до  $10-12 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$ . Реки болотного происхождения и поверхностные источники в период паводка отличаются очень высокой окисляемостью, превышающей, например,  $30 \text{ мгО}_2/\text{дм}^3$ . Сточные воды, содержащие органические вещества и сбрасываемые в водоемы, могут повышать окисляемость воды различных источников.

Для суммарной оценки органических загрязнений воды в последнее время начинают применять метод сорбции из воды органических веществ активированным углем с последующим его высушиванием и экстракцией из него этих веществ хлороформом (метод угольно-хлороформного экстракта). В массовых единицах ( $\text{мг}/\text{дм}^3$ ) оценивают в ряде случаев содержание общего органического углерода в воде.

**Жесткость воды** – один из важнейших показателей её качества. Общей жесткостью  $J_0$  называют суммарную концентрацию ионов кальция и магния, выраженную в единицах миллиграмм-эквивалент ( $\text{мг-экв}/\text{дм}^3$ ) на  $1 \text{ дм}^3$  воды.

Общую жесткость воды подразделяют на кальциевую и магниевую. Кальциевая жесткость определяется катионами кальция  $\text{Ca}^{2+}$  ( $\text{мг-экв}/\text{дм}^3$ ). Магниевая жесткость определяется катионами магния  $\text{Mg}^{2+}$  ( $\text{мг-экв}/\text{дм}^3$ ).

Общая жесткость подразделяется на карбонатную  $J_K$  и некарбонатную  $J_{н.к.}$ . Карбонатная жесткость обуславливается наличием в воде бикарбонатов и карбонатов кальция и магния, некарбонатная жесткость – присутствием в воде хлоридов, нитратов, сульфатов кальция и магния ( $\text{мг-экв}/\text{дм}^3$ ).

$$J_0 = J_K + J_{н.к.},$$

$$J_0 = J_{\text{Ca}^{2+}} + J_{\text{Mg}^{2+}}.$$

Процесс снижения концентрации ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  получил название умягчение воды. Воды с высокой жесткостью дают плотные отложения на теплопередающих поверхностях.

По значению общей жесткости природных вод установлена следующая классификация:  $J_0 < 1,5$  мг-экв/дм<sup>3</sup> – малая жесткость,  $J_0 = 1-3,0$  мг-экв/дм<sup>3</sup> – средняя,  $J_0 = 3,0-6,0$  мг-экв/дм<sup>3</sup> – повышенная,  $J_0 = 6,0-12,0$  мг-экв/дм<sup>3</sup> – высокая,  $J_0 > 12$  мг-экв/дм<sup>3</sup> – очень высокая жесткость.

Общая щелочность воды  $\Sigma_0$  – суммарная концентрация в воде анионов слабых кислот  $C_{\text{ан.сл.кислот}}$ , и гидроксид-ионов  $C_{\text{ОН}^-}$  за вычетом концентрации ионов водорода  $C_{\text{Н}^+}$ , мг-экв/дм<sup>3</sup>.

$$\Sigma_0 = \sum C_{\text{ан.сл.кислот}} + C_{\text{ОН}^-} - C_{\text{Н}^+},$$

$$\sum C_{\text{ан.сл.кислот}} = C_{\text{НСО}_3^-} + C_{\text{СО}_3^{2-}} + C_{\text{НСиО}_3^-} + C_{\text{СиО}_3^{2-}} + C_{\text{Н}_2\text{РО}_4^-} +$$

$$+ C_{\text{НРО}_4^{2-}} + C_{\text{РО}_4^{3-}}.$$

Общую щелочность  $\Sigma_0$  выражают в мг-экв/дм<sup>3</sup>. Её определяют титрованием пробы воды кислотой в присутствии индикаторов: фенолфталеина и метилоранжа. Для вод, в которых может содержаться гидратная форма щелочности ( $\text{ОН}^-$ ), карбонатная ( $\text{СО}_3^{2-}$ ) или бикарбонатная ( $\text{НСО}_3^-$ ), вычисление отдельных форм (слагаемых) общей щелочности определяют по табл. 1.1 в зависимости от результатов титрования пробы с фенолфталеином –  $\Sigma_{\text{фф}}$  и метилоранжем –  $\Sigma_{\text{мо}}$ .

Таблица 1.1

## Вычисление форм щелочности природной воды

Соотношение $\Sigma_{\text{фф}}$	Гидраты $\Sigma_{\text{г}}$	Карбонаты $\Sigma_{\text{к}}$	Бикарбонаты $\Sigma_{\text{б}}$
$\Sigma_{\text{фф}} = \Sigma_{\text{мо}}$	$\Sigma_{\text{фф}}; \Sigma_{\text{мо}}$	Нет	Нет
$\Sigma_{\text{фф}} > 0,5 \Sigma_{\text{мо}}$	$2\Sigma_{\text{фф}} - \Sigma_{\text{мо}}$	$2(\Sigma_{\text{мо}} - \Sigma_{\text{фф}})$	Нет
$\Sigma_{\text{фф}} = 0,5 \Sigma_{\text{мо}}$	Нет	$\Sigma_{\text{мо}}; 2\Sigma_{\text{фф}}$	Нет
$\Sigma_{\text{фф}} < 0,5 \Sigma_{\text{мо}}$	Нет	$2\Sigma_{\text{фф}}$	$\Sigma_{\text{мо}} - 2\Sigma_{\text{фф}}$
$\Sigma_{\text{фф}} = 0; \Sigma_{\text{мо}} > 0$	Нет	Нет	$\Sigma_{\text{мо}}$

Природные воды в своем большинстве характеризуются бикарбонатной формой щелочности  $\Sigma_{\text{б}}$ , которая численно близка к величине общей щелочности ( $\Sigma_0 \sim \Sigma_{\text{б}}$ ).

В природных исходных водах соотношения между щелочностью и общей жесткостью могут быть различными, соответственно вычисляются значения карбонатной жесткости (табл. 1.2).

Таблица 1.2

## Вычисление карбонатной жесткости природной воды

Щелочность исходной воды $\text{Щ}_{\text{и.в}}$	Карбонатная жесткость исходной воды
$\text{Щ}_{\text{и.в}} < \text{Ж}_0$	$\text{Ж}_\text{к} = \text{Щ}_{\text{и.в}}$
$\text{Щ}_{\text{и.в}} = \text{Ж}_0$	$\text{Ж}_\text{к} = \text{Ж}_0$
$\text{Щ}_{\text{и.в}} > \text{Ж}_0$	$\text{Щ}_{\text{и.в}} - \text{Ж}_\text{к} = \text{Ж}_0; \text{Щ}_{\text{и.в}} - \text{Ж}_0 = [\text{NaHCO}_3]$

**Ионный состав воды.** Вода всегда электронейтральна, поэтому сумма концентраций содержащихся в ней катионов равна сумме концентраций анионов при условии, что они выражены в мг-экв/дм<sup>3</sup>:  $\sum \text{Kt} = \sum \text{An}$ .

Этой закономерностью, называемой уравнением электронейтральности раствора, пользуются при проверке правильности выполнения анализа воды. В водах энергетических объектов могут присутствовать ионы, приведенные в табл. 1.3 [2].

Таблица 1.3

## Ионный состав воды

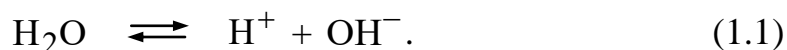
Катионы		Анионы	
Наименование	Обозначения	Наименование	Обозначения
Водород	$\text{H}^+$	Гидроксильный	$\text{OH}^-$
Натрий	$\text{Na}^+$	Бикарбонатный	$\text{HCO}_3^-$
Калий	$\text{K}^+$	Карбонатный	$\text{CO}_3^{2-}$
Аммоний	$\text{NH}_4^+$	Нитритный	$\text{NO}_2^-$
Кальций	$\text{Ca}^{2+}$	Нитратный	$\text{NO}_3^-$
Магний	$\text{Mg}^{2+}$	Хлоридный	$\text{Cl}^-$
Железо двухвалентное	$\text{Fe}^{2+}$	Фторидный	$\text{F}^-$
Железо трехвалентное	$\text{Fe}^{3+}$	Сульфатный	$\text{SO}_4^{2-}$
Алюминий	$\text{Al}^{3+}$	Силикатный	$\text{SiO}_3^{2-}$
Медь	$\text{Cu}^{2+}$	Ортофосфатный	$\text{PO}_4^{2-}$
		Гидросульфатный	$\text{HS}^-$

В природных водах обычно содержится катионы  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^{+}$  и анионы  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^{-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^{-}$ , реже  $\text{NH}_4^{+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  и  $\text{NO}_2^{-}$ ,  $\text{NO}_3^{-}$ ,  $\text{HS}^{-}$ .

Двухвалентное железо встречается в подземных водах в виде бикарбонатов  $\text{Fe}(\text{HCO}_3)_2$ .

Соединения трехвалентного железа встречаются в поверхностных водах, они находятся преимущественно в коллоидном состоянии.

Наличие в природных водах соединений азота, а именно ионов аммония ( $\text{NH}_4^{+}$ ), нитритов ( $\text{NO}_2^{-}$ ) и нитратов ( $\text{NO}_3^{-}$ ), указывает на загрязнение источника водоснабжения хозяйственно-бытовыми стоками. Химически чистая вода является очень слабым электролитом, только одна из десяти миллионов молекул диссоциирует на ионы  $\text{H}^{+}$  и  $\text{OH}^{-}$ :



Отрицательный логарифм концентрации водородных ионов, называемый водородным показателем рН, для обессоленной воды равен 7. В зависимости от значения рН водного раствора оценивают реакцию среды (табл. 1.4)

Таблица 1.4

## Реакция среды в зависимости от рН

Реакция среды	Значение рН
Кислая	1–3
Слабокислая	4–6
Нейтральная	7
Слабощелочная	8–10
Щелочная	11–14

Вода для питьевых целей имеет рН = 6,5–9,0 (ГОСТ 2874-82).

**Растворённые газы.** Для вод, используемых для энергетических целей, важное значение имеют растворенные в воде газы: кислород, углекислый газ, сероводород, аммиак.

Кислород поступает в воду из воздуха, где его содержится около 2,1 %. Концентрация кислорода в поверхностных водах близка к значению растворимости его при данной температуре и давлении.

Растворимость кислорода при контакте с воздухом при атмосферном давлении 760 мм рт. ст. приведена в табл. 1.5.

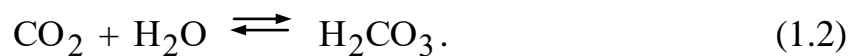


Таблица 1.5

## Растворимость кислорода в природной воде

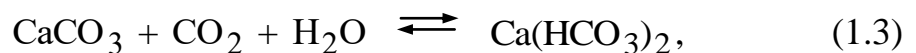
Температура, °С	0	10	20	25	90	100
Содержание O <sub>2</sub> , мг/л	14,6	11,3	9,1	8,3	1,6	0

Основным источником поступления в воду углекислоты (содержание CO<sub>2</sub> в воздухе невелико – всего 0,04 %) являются биохимические процессы разложения органических веществ в природе. Растворяясь в воде, CO<sub>2</sub> реагирует с водой, образуя гидратированную форму H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>:



При анализе воды определяется суммарная концентрация обеих форм углекислоты.

Когда природная вода не является насыщенным раствором по CaCO<sub>3</sub> и при этом содержит CO<sub>2</sub>, реакция протекает слева направо:



т.е. идет процесс растворения карбоната кальция при контакте воды, например, с известковыми породами или с бетонными сооружениями. Когда природная вода является стабильной, т.е. насыщенным раствором по CaCO<sub>3</sub>, реакция не протекает.

Содержание в воде углекислоты следует определять аналитически.

Состав, структура и физические свойства отложений в котлах зависят в основном от химического состава и температуры котловой воды. В свою очередь, химический состав котловой воды определяется питательной водой и применяемыми методами коррекционной обработки. Температура котловой воды определяется рабочими параметрами и конструктивными особенностями котлов, а также видом сжигаемого топлива. Эти факторы влияют на локальные тепловые потоки экранной системы, неравномерность тепловых потоков присуща котлам, работающим на жидком топливе и оборудованным мощными горелочными устройствами.

Химический состав вод некоторых источников водоснабжения приведён в табл. 1.6 [1, 3].

Таблица 1.6

## Примерный химический состав показателей качества некоторых источников водоснабжения

Источник	Место отбора пробы	Ca <sup>2+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	Mg <sup>2+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	Na <sup>+</sup> + K <sup>+</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	Cl <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> , мг/дм <sup>3</sup>	Взвешенные вещества, мг/кг	Окисляемость, кг/кг	Ж <sub>о</sub> , мг- экв/дм <sup>3</sup>	Ж <sub>к</sub> , мг- экв/дм <sup>3</sup>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
<b>Реки</b>													
Амударья	г. Керки	90,2	15,2	118,6	190,4	202,7	126,9	0	10,0	4970	0	5,76	3,12
Амур	г. Хабаровск	13,4	2,5	0	42,7	4,2	3	0	9	35,0	2,8	0,87	0,7
Ангара	г. Ангарск	16,5	4,3	4,3	67,6	7	2,2	0	0	17	2,6	1,18	1,11
Белая	г. Салават	66,3	14,4	4,14	216	37	13	0	15	350,84	0	4,5	3,54
Белая	г. Уфа	234,47	8,482	9,2	353,858	321,6	11,203	0	15	0	0		
Волга	г. Балахна	28	8,15	4,5	103,7	24,7	1,8	0	1	0	16,8	2,07	1,7
Волга	г. Волгоград	60	9,7	22,8	158,5	57,4	35	0	8	0	10,4	3,8	2,6
Волга	г. Казань	72	14,5	20,3	140,3	140	15	0	3	10	11,2	4,8	2,3
Волга	г. Калинин	48	10,9	30,8	201	49	7,84	5,5; 0,31	8,3	3	4,64	3,3	3,3
Волга	г. Саратов	62	13,2	38,2	146	120	34	0	2,5	0	3,7	4,2	2,2
Волга	г. Энгельс	32,2	10,8	20,9	116	34,6	28	0	0	76	4,8	2,5	1,9
Волга	г. Ярославль	34,4	9,1	2,2	119	23,1	5,8	0	8,7	13	14,2	2,5	1,95
Волхов	г. Новгород	23,7	3,5	6,2	73,2	6,7	14	0,3	13,7	0	25,3	1,47	1,2
Воронеж	г. Липецк	72,2	17,4	12,5	280,6	33,5	10	0	21,6	0	0	5,1	4,6
Вятка	г. Кирово-Чепецк	19,04	2,43	0	58	19,3	3,18	6	17,3	15	10,22	1,15	0,9
Даугава	г. Даугавпилс	42,7	13,1	4	183	12,6	3,7	0,3	13	50	12,5	3,2	3
Северная Двина	г. Архангельск	102	16,8	6,9	264	93,2	7,1	0	10,2	0	8,5	6,48	4,34
Десна	г. Чернигов	68,7	10,3	6,1	250,8	15	4,9	0	0	14	5,3	4,29	4,1
Днепр	г. Запорожье	51,9	15	8,6	188	29,7	15,8	2,4; 0,2	4	0	10,2	3,82	3,08
Дон	г. Задонск	53,9	29,4	19,6	293,5	48,2	5	0	0	0	5,8	5,1	4,81

Продолжение табл. 1.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Дон	г. Ростов-на-Дону	37,308	110,821	146	231,842	291	182	0,89	0	0	2,8	3,5	5,83
Северский Донец	г. Лисичанск	84	7,3	10,8	195,2	48	38	0	22	0	0	4,8	3,2
Енисей	г. Красноярск	37	9,1	0	140	10,1	3,2	0	11,4	2,6	1	2,6	3,3
Иртыш	г. Омск	28	17	36,1	165	31,7	34	3; 0,07	5,7	172,4	14,8	2,8	2,7
Исеть	г. Екатеринбург	20,04	2,41	1,2	42,7	1,2	17,93	0	1	0	17,5	1,2	0,7
Кама	г. Березняки	90	8,5	240	134,4	50,4	440	0	9,7	155	11,8	5,2	2,2
Кама	г. Нижнекамск	54	8,6	8,2	125,7	39,6	29	3,4; 0,021	3,9	6,25	4,6	3,4	2,061
Каменка	г. Донбасс	109	40,2	41	463	112	20,3	0	15	0	0	8,75	7,6
Клязьма	г. Владимир	47	10,3	25,1	158,7	52,7	21	1,2	16,6	8	9	3,2	2,6
Кострома	г. Кострома	53,6	8,3	4	113,5	62,5	13,2	0	0	0	0	3,36	1,86
Кубань	г. Армавир	58,6	6,5	14,2	146,5	59,2	14	0	0	0	0	3,47	2,4
Кура	г. Али-Байрамлы	60	53	161	232	197	214	26	20	300	5,5	7,36	3,8
Лена		47,2	13,4	81,3	147,5	61,9	116,6	0	0	0	0	3,46	2,42
Лопань	г. Харьков	167	30,6	67,6	400	282	47	0	4,1	0	0	10,7	6,6
Лугань	г. Донбасс	70,1	55	120	148	354	123	0	17,7	0	0	8,05	2,42
Миасс	г. Челябинск	56	22,8	39,6	85,5	214	19	0	6	44	8,6	4,67	1,4
Москва	г. Москва	60	15,8	0	201	13,5	25,5	0	10	0	8,3	4,3	3,3
Нарва	Эстония	24,3	11,2	4,6	115	14	4,6	0	0	0	0	2,14	1,9
Нева	г. Санкт-Петербург	9	1,2	2,7	26,2	6,1	3,9	0	5,9	0	7,6	0,55	0,43
Неман	г. Каунас	56,4	16,8	10,4	251,1	8,9	13	0,1	2,2	18	5	4,2	4,1
Норилка	г. Норильск	12,6	2,5	18	48	27,072	8,4	0	11	0	0	0,835	0,787
Обь	г. Новосибирск	49,2	9,4	0,7	74	91,2	5,2	0,1	12,5	405	2,9	3,23	1,21
Ока	г. Нижний Новгород	91,8	16,8	7,8	244	81	22	0	17,8	62,4	13,6	5,97	4
Печора	г. Усть-Цильма	12,2	3,53	2,6	47	5,8	4	0	7,6	0	16	0,9	0,78

Продолжение табл. 1.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Свияга	г. Ульяновск												
Тобол	г. Кустанай	93	43,5	243,1	228,2	294,6	300,7	0	0	18	0	8,22	3,75
Томь	г. Кемерово	23,4	5,2	0	58,3	20,5	8,8	0	19,2	753	5,8	1,6	0,96
Томь	г. Новокузнецк												
Торец Каменный	г. Донбасс	158	64	209	570	414	244	0	39,2	0	8,7	13,1	9,35
Тура	г. Нижняя Тура	24	6,90	5,2	87,2	19,8	5,4	0	9,2	8	5,7	1,77	1,43
Уводь	г. Иваново	51	11,55	18,3	176,5	34,1	22	4	2,65	0	12,8	3,5	2,9
Урал	г. Гурьев	108,2	9,70	107,3	234,2	107	170	0	9,1	34	5,2	6,2	3,84
Цна	г. Тамбов	100	23,10	20,3	275	95	40	10	28	25	5,7	6,9	4,5
Шексна	г. Череповец	61,6	15,80	2,3	128,1	97,7	2,4	0	6,7	10,4	12,1	4,1	2,1
<b>Водохранилища</b>													
Исаковское	г. Коммунарск	110	48,60	154	244	488	67	6	2,1	0	3,6	9,5	4
Карочуновское	г. Кривой рог	54	26,40	44,1	201	112	41	0	1,8	0	6,24	4,87	3,3
Луганское	пос. Мироновский	102,2	71,60	215	225,7	528	201	0,3	7,7	0	7,6	11	4,1
Нуринское	г. Тимер-Тау	70,6	40,20	237	268	264	255	0	6,6	0	7,3	6,8	4,4
Серделеевское	г. Ставрополь			36,8		122,4	24,2	0		32	1,6	3,75	
Терновское	г. Курахово	240	170,60	668	213	1516	684	0	2,7	0	4,5	26,1	3,5
Шолларское	г. Баку Азербайджан	58	27,00	54	281	88	25	20,8	12	0	0,64	5,12	4,6
<b>Пруды</b>													
Верхне- Тагильский	ВТГРЭС	44,5	10,30	8,98	103,7	71,3	10	0	11,3	0	13,2	3,08	1,7
Несветай ГРЭС	г. Красный Сулин	84,1	50,50	246	201	646	82	0	5,64	0	24	8,35	3,3
Ново- Грозненский	г. Грозный	98,2	30,40	29,5	231,9	194	28	2,4	19	14	3,92	7,4	3,8
Черепетская ГРЭС	г. Суворов	56,9	6,00	5,1	164,5	35,3	4,5	0	6,3	0	4,9	3,34	2,7

Окончание табл. 1.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
<b>Артезианские скважины</b>													
Кохтла-Ярве	Эстония	48,6	33,40	0	279	12,5	12,3	0	19,3	0	0	5,18	4,57
Краматорск	Донецкая область	166	39,01	44	305	336	190	24	35	0	3,2	11,5	5
Львов	Западная Украина	67,3	2,50	5,7	216	6,6	5	0	15,7	0	0	3,57	3,54
ТЭЦ ЗИЛ	г. Москва	71,4	29,60	37,6	293	99,5	27	0	13,2	0	8,7	6,0	4,8
<b>Озера</b>													
Аникштай	Литовская ГРЭС	56,4	18,00	2,99	232	21	7,1	0,08	16	17	0	4,3	3,8
Байкал	Восточная Сибирь	21,3	4,3	0,3	68,3	6,4	3,5	0	0	0	0	1,43	1,12
Балхаш	Казахстан	38,7	106	331	194	572	345	0	10,1	0	0	10,7	3,17
Верхне-Исетское	Урал	7,2	4,8	1,24	24,4	12	2	0	1,2	0	0	0,76	0,4
Телецкое	Алтай	12,85	2,29	5,8	51,8	2,8	0,77	0	5,7	0	0	0,83	0,83
<b>Моря</b>													
Черное		246	648	5530	81	1305	9626	0	0	0	0	65,6	0
Каспийское		381	764	3274	105	3013	5407	0	0	0	0	66,5	0
<b>Океан</b>		418	1329	11030	146	2767	19833	0	0	0	0	131,3	0

### **Контрольные вопросы к главе 1**

1. Назовите технологические процессы, осуществляемые в тепло-энергетических установках, в которых используется природная вода.

2. Охарактеризуйте назначение различных потоков воды в рабочих циклах ТЭС.

3. Объясните в чем качественное отличие поверхностных и подземных вод.

4. Перечислите какие признаки лежат в основе различных классификаций природных вод.

5. Дайте определение физико-химическим и технологическим показателям качества воды.

## **ГЛАВА 2. ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ОБОРУДОВАНИЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

Нормирование водного режима включает в себя нормы качества пара, питательной и котловой воды. Высокие качества требований к чистоте пара не могут быть обеспечены без соответствующей чистоты питательной воды.

### **2.1. Водно-химический режим подогревателей низкого и высокого давления**

Гидразино-аммиачный водно-химический режим (ВХР) барабанных котлов предусматривает уменьшение коррозии тракта подогревателей высокого давления (ПВД) и самих ПВД, выполненных из простых сталей (сталь 20). Гидразин ( $N_2H_4$ ) ликвидирует кислород, оставшийся после термической деаэрации, а аммиак повышает значение рН и связывает остатки углекислоты. Оба эти фактора уменьшают коррозию питательного тракта в целом, так как трубки подогревателей низкого давления (ПНД) и ПВД в конденсатном тракте барабанных котлов применяются в латунном исполнении, поэтому щелочной режим является определяющим.

### **2.2. Водно-химический режим турбины**

Основной принцип нормирования чистоты пара наиболее полно относится к кремниевой кислоте: ее концентрация при входе в турбину должна быть такой, чтобы обеспечить растворимость ее в паре на всем тракте турбины, включая область перехода к насыщенному, а затем влажному пару.

Так как добавочную воду готовят в обессоливающей установке, то это условие выполнимо. Что же касается медных отложений в турбине, то в связи со значительным влиянием давления на растворимость меди (при  $p = 12,7$  МПа,  $t = 540$  °С) они отсутствуют. Таким образом, надежный ВХР можно считать обеспеченным.

### **2.3. Водно-химический режим конденсаторов турбин**

Используемые для охлаждения природные воды содержат растворенные коллоидные и грубодисперсные вещества, а также растительные и животные организмы. Попадая в систему технического

водоснабжения, природная вода под действием специфических факторов изменяет свой физико-химический и биологический состав, что может привести к образованию отложений в конденсаторах турбин и на оросителях градирен.

Основными показателями качества охлаждающей воды, способствующими загрязнению внутренних поверхностей трубок конденсаторов турбин и оросителей градирен, являются:

1) склонность к выделению нерастворимых солей при нагреве воды в конденсаторе;

2) наличие микро- и макроорганизмов, способных поселяться и развиваться на поверхностях теплообмена (зооглейные бактерии, нитчатые и железобактерии, микроскопические грибки и диатомовые водоросли);

3) наличие механических взвесей (шлама, ила, песка и т.п.), которые могут оседать особенно в присутствии микроорганизмов на поверхностях трубок конденсаторов.

Загрязнение конденсаторов турбин отложениями минерального и органического характера приводит к ухудшению вакуума в конденсаторах турбин и, как следствие, к значительному перерасходу топлива, а в ряде случаев – к ограничению мощности турбин. Отложение карбонатной накипи на оросителях градирен снижает охлаждающий эффект градирни и может привести к разрушению оросителей. Кроме того, образующиеся в конденсаторах турбин отложения интенсифицируют процессы коррозии металла трубок.

Для обеспечения чистоты поверхностей трубок конденсаторов турбин и других трактов технического водоснабжении необходимо внедрять, в первую очередь, мероприятия, предотвращающие накипеобразование. В случае невозможности предотвращения образования отложений в конденсаторах турбин следует проводить их периодическую очистку химическим, термическим или механическим способами [4].

## **2.4. Водно-химический режим тепловых сетей**

### ***2.4.1. Водоподготовка подпиточной воды для систем теплоснабжения***

Как известно, системы теплоснабжения предназначены для получения, транспортировки и использования тепловой энергии. Они в основном состоят из источника тепла – сети, служащей для транспортировки теплоносителя от источника тепла к месту её использования и потребителей тепловой энергии [4].



В качестве источника тепла используются котельные различного назначения, тепловые электрические централи, атомные тепловые электрические централи и атомные станции теплоснабжения. Атомные станции теплоснабжения предназначены для утилизации отработанного в атомных тепловых электрических станциях топлива [5, 6].

Потребителями тепловой энергии при этом являются системы теплоснабжения жилых, общественных и промышленных зданий, их системы горячего водоснабжения, вентиляция общественных и промышленных зданий, а иногда и промышленные предприятия. В качестве теплоносителей от источника тепла к источнику потребления тепловой энергии применяются в основном вода и водяной пар. Соответственно по типу применяемого теплоносителя тепловые сети подразделяются на водяные и паровые. Даже при нормальной работе системы теплоснабжения в них имеют место потери воды и пара. Последние имеют место на источниках тепла с паровыми котлами, в том числе и на тепловых электрических станциях. В зависимости от параметров вырабатываемого пара на источниках выработки тепловой энергии для восполнения потерь в качестве добавочной воды используется обессоленная или же глубокооумягченная вода [7–13].

Тепловые сети являются сложными гидродинамическими системами, служащими для транспортировки и передачи тепловой энергии потребителям. При эксплуатации в этих сетях также имеются потери теплоносителя через неплотности соединений, сальники арматуры, компенсаторы и т.д. Если учесть, что в тепловых сетях в качестве теплоносителя в основном используется вода, частичные потери последней, приводят к разрегулировке и нарушению нормального гидравлического режима работы системы [14–16].

Поэтому для поддержания нормального гидродинамического режима работы на тепловых сетях, для компенсации имеющихся потерь требуется постоянная подпитка системы водой.

В открытых же тепловых сетях кроме потерь воды имеет место и водозабор из тепловой сети на горячее водоснабжение. Надежная и бесперебойная работа тепловых сетей наряду с различными факторами определяется и качеством подпиточной воды, используемой для восполнения потерь в этих системах [10, 11].

Качество подпиточной воды должно обеспечивать безнакипный режим работы оборудования в источнике тепла и на местах передачи тепловой энергии без образования шлама в отдельных узлах системы, предотвращать их коррозию оборудования. Если теплосеть является открытой, то кроме выше отмеченных требований качество подпиточной воды еще должно удовлетворять и требованиям, предъявляемым

к качеству питьевой воды. Качество воды для подпитки тепловых сетей согласно РД 34.20.501-95 должно удовлетворять следующим нормам:

- содержание свободной угольной кислоты.....0
- значение рН для систем теплоснабжения:  
закрытых .....8,3–9,5
- содержание соединений железа, мг/дм<sup>3</sup>, не более, для систем теплоснабжения:  
закрытых.....0,5
- содержание растворенного кислорода, мкг/дм<sup>3</sup>, не более..... 20
- количество взвешенных веществ, мг/дм<sup>3</sup>, не более ..... 5
- содержание нефтепродуктов, мг/дм<sup>3</sup>, не более, для систем теплоснабжения:  
закрытых.....1

Кроме этого, качество подпиточной воды теплосети согласно этим же нормам должно удовлетворять карбонатному индексу – предельному значению произведения общей щелочности (Щ<sub>о</sub>) и кальциевой жесткости (Ж<sub>Ca</sub>) воды (в мг-экв/дм<sup>3</sup>), выше которого карбонатное накипеобразование протекает с интенсивностью более 0,1 г/(м<sup>2</sup>·ч):

$$I_k = \text{Щ}_o \cdot \text{Ж}_{Ca}. \quad (2.1)$$

Допустимое значение карбонатного индекса подпиточной воды зависит от типа установленного в источнике тепла оборудования, расчетной температуры воды и типа теплосети. Нормативные значения карбонатного индекса подпиточной воды теплосети приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Нормативные значения  $I_k$  при нагреве сетевой воды в сетевых подогревателях в зависимости от рН воды

Температура нагрева сетевой воды, °С	$I_k$ (мг-экв/дм <sup>3</sup> ) при значениях рН			
	Не выше 8,5	8,51–8,8	8,81–9,2	Выше 9,2
70–100	4,0	2,6	2,0	1,6
101–120	3,0	2,1	1,6	1,4
121–140	2,5	1,9	1,4	1,2
141–150	2,0	1,5	1,2	0,9
151–200	1,0	0,8	0,6	0,4

Карбонатный индекс  $I_K$  сетевой воды при нагреве ее в водогрейных котлах должен быть не выше значений, приведенных в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Нормативные значения  $I_K$  при нагреве сетевой воды в водогрейных котлах в зависимости от рН воды

Температура нагрева сетевой воды, °С	$I_K$ (мг-экв/дм <sup>3</sup> ) при значениях рН			
	Не выше 8,5	8,51–8,8	8,81–9,2	Выше 9,2
70–100	3,5	2,3	1,8	1,5
101–120	2,0	1,5	1,2	1,0
121–140	1,5	1,9	1,0	0,7
141–150	1,2	1,0	0,8	0,5
151–200	0,8	0,7	0,5	0,3

Качество подпиточной воды теплосети должно быть таким, чтобы обеспечить нормативное значение  $I_K$  сетевой воды.

Для подготовки подпиточной воды теплосети в зависимости от условий её работы и требований предъявляемых к охране окружающей среды, от возможности использования различных реагентов и оборудования применяются следующие методы:

- подкисление;
- известкование с последующим подкислением;
- содоизвесткование с последующим подкислением;
- обработка магнезитом;
- обработка комплексонатами;
- магнитная обработка;
- ионирование.

Наиболее простым и широко распространенным среди этих методов является подкисление, в процессе чего в обрабатываемую воду вводится кислота, кислая среда способствует разрушению бикарбонат ионов воды и снижению её щелочности [11]. В результате образуется углекислый газ, который удаляется из воды при декарбонизации и последующей деаэрации. Однако при этом в подпиточной воде при вводе для подкисления  $H_2SO_4$  повышается концентрация  $SO_4^{2-}$ . В случае несоответствия показателей подкисленной воды требуемым показателям качества подпиточной воды можно осуществить известкование с последующим подкислением. Для этого обрабатываемая вода в осветлителе подвергается

известкованию с коагуляцией. При этом в обрабатываемой воде кроме снижения щелочности уменьшается также и карбонатная жесткость. Для уменьшения расхода извести процесс известкования воды целесообразно вести в бикарбонатном режиме, и осадить из воды только  $\text{CaCO}_3$  [10, 11]. Учитывая, что рН полученной при этом известково-коагулированной воды превышает норму необходимой для подпиточной воды, она дополнительно подкисляется. Для подкисления обычно используется серная кислота. Однако указанный метод не эффективен для вод при малых значениях карбонатной жесткости. Поэтому для таких типов вод следует применять содоизвесткование с последующим подкислением. При содоизвестковании с последующим подкислением при помощи соды (каустической –  $\text{NaOH}$ , кальцинированной –  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  или же пищевой –  $\text{NaHCO}_3$ ) достигается также и снижение некарбонатной жесткости вод.

В последнее время для предотвращения накипеобразования в тепловых сетях применяется также метод подготовки подпиточной воды теплосети обработкой комплексонатами [17, 18].

В результате такой обработки устраняется лишь накипеобразующие свойства соединений, и снижается коррозионная активность воды. Для этого используются специальные реагенты – комплексонаты, такие как, например, «Комплексон-6», ОЭДФК (оксиэтилидендифосфоновая кислота), ИОМС (ингибитор отложения минеральных солей) и т.д. Указанные реагенты дозируются в воду в количестве, зависящим от концентрации карбонатной жесткости исходной воды, от 0,25 до нескольких единиц мг/л. ОЭДФК сорбируется на поверхности зародышей кристаллов  $\text{CaCO}_3$  и предотвращает рост их размеров и агломерацию. Несмотря на то, что вода при этом по  $\text{CaCO}_3$  находится в пересыщенном состоянии, отложение накипи при этом не происходит.

При магнитной обработке обрабатываемая вода пропускается между полюсами постоянного магнита [11, 19]. Под воздействием магнитного поля в обрабатываемой воде образуется большое количество зародышей твердой фазы, выполняющих роль центров кристаллизации (рис. 2.1).

Магнитное поле пересекает поток воды в направлении, перпендикулярном её движению. Кристаллизация в присутствии большого количества зародышей приводит к тому, что карбонат кальция ( $\text{CaCO}_3$ ) или совсем не выделяется из воды или выделяется в виде тонкодисперсной

взвеси, не осевшей в виде накипи. Эффективность противонакипной обработки зависит от характеристик магнитного поля, скорости потока воды, химического состава воды, производительности аппарата, которые устанавливаются при наладке.

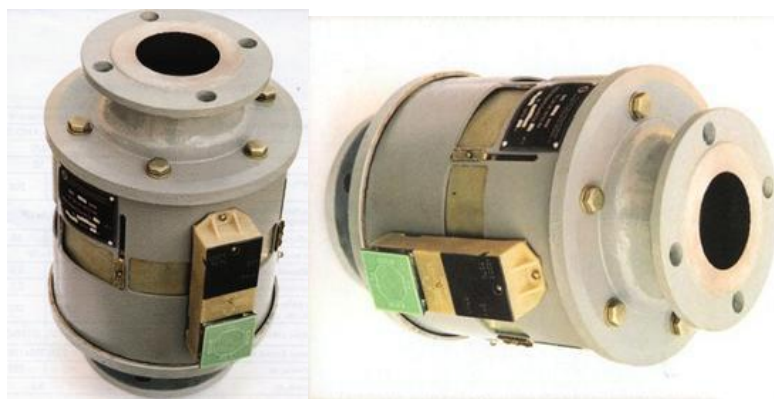


Рис. 2.1. Аппарат магнитной обработки воды на электромагнитах АМО-25УХЛ

Однако магнитная обработка воды не всегда дает положительные результаты. Особенно в тепловых сетях с водогрейными котлами при использовании в качестве топлива мазута применение указанного вида обработки не целесообразно [20].

Таким образом, использование вышеперечисленных методов обработки воды для подпитки теплосети позволяет лишь уменьшить интенсивность процесса накипеобразования, не предотвращая его полностью. Практически полное предотвращение накипеобразования достигается использованием ионообменных технологий обработки воды (рис. 2.2). Основными недостатками использования катионитовых фильтров для подготовки добавочной воды теплосети являются [15]:

- высокая стоимость оборудования;
- громоздкость, высокая трудоемкость монтажа и наладки;
- высокие энергозатраты на эксплуатацию;
- нестабильность в работе (возможность проскоков жесткости);
- значительные затраты на замену и досыпку ионообменных смол;
- большой объем сточных вод;

Катионирование не позволяет удалять органические примеси, что приводит к интенсификации коррозионных процессов оборудования. Кроме того, чрезмерная нагрузка по этим примесям приводит к снижению обменной емкости катионитов.

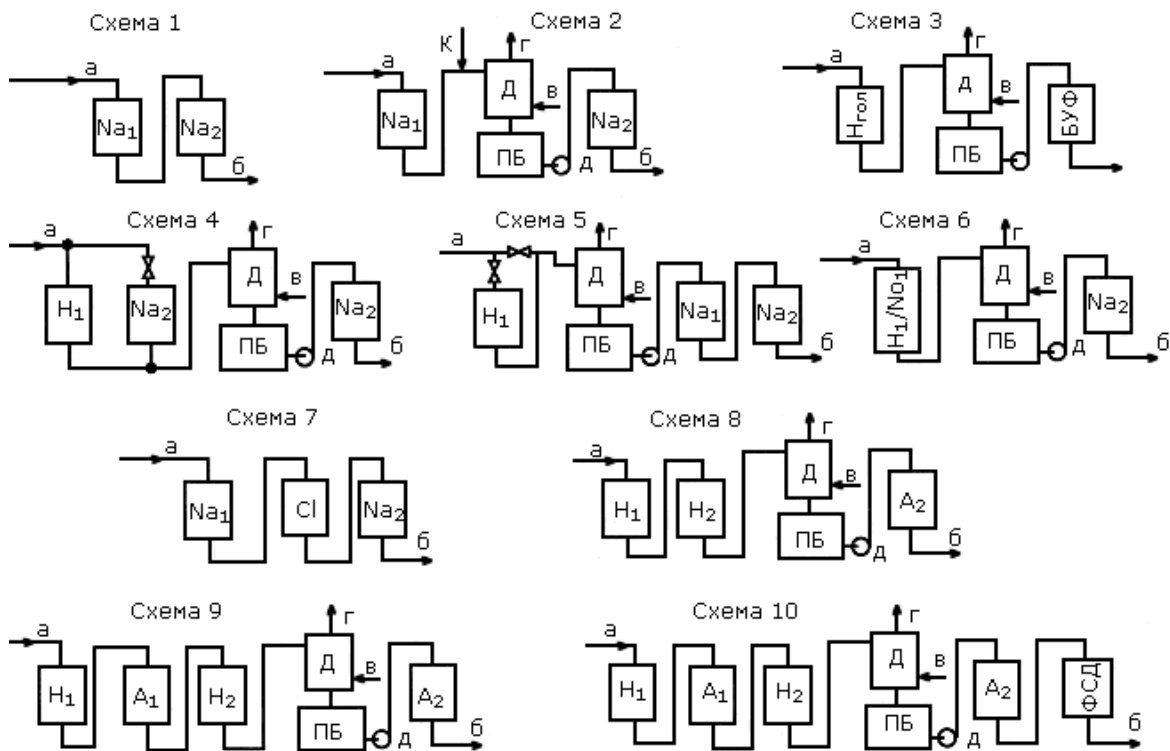


Рис. 2.2. Основные принципиальные схемы ионитных установок приготовления добавочной воды для котлов и подпиточной воды для теплосети:

$Na_1, Na_2$  – Na – катионитовые фильтры первой и второй ступеней;

$Na_{ГОЛ}$  – H-катионитный фильтр с «голодной» регенерацией; БУФ – буферный нерегенерируемый фильтр;  $A_1$  и  $A_2$  – анионитовые фильтры первой и второй ступеней;

$H_1$  и  $H_2$  – H-катионитовые фильтры первой и второй ступеней; CI – анионитовый фильтр в CI-форме; ФСД – фильтр смешанного действия; Д – декарбонизатор;

ПБ – промежуточный бак; а – подвод осветленной воды; б – выход фильтрата;

в – воздух в декарбонизатор; г – выход углекислого газа из декарбонизатора;

д – промежуточный насос; К – подвод кислоты

Использование коррозионно-нестойких материалов для изготовления фильтров является причиной частых и дорогостоящих ремонтных работ, в том числе по созданию и восстановлению антикоррозийных покрытий. К недостаткам умягчения воды на натрий-катионитных фильтрах относятся также потребление в больших количествах соли, расход воды на собственные нужды химводоочистки и загрязнение водоемов сточными водами, содержащими хлориды в высоких концентрациях. Следует отметить, что нейтрализация и утилизация засоленных сточных вод ТЭС является одной из экологических проблем [21]. В настоящее время затраты на реализацию различных предложений по обработке и утилизации стоков зачастую превышают стоимость самой водоподготовки.

Исключить агрессивные стоки, а также сократить затраты на водоподготовку позволяет использование мембранных методов очистки воды с подкислением и последующим подщелачиванием подпиточной воды.

На Казанской ТЭЦ-2 введена в эксплуатацию первая в России установка подпитки теплосети на базе мембранных технологий производительностью  $300 \text{ м}^3/\text{ч}$ , совмещенная со схемой обессоливания для подпитки энергетических котлов (рис. 2.3) [22].

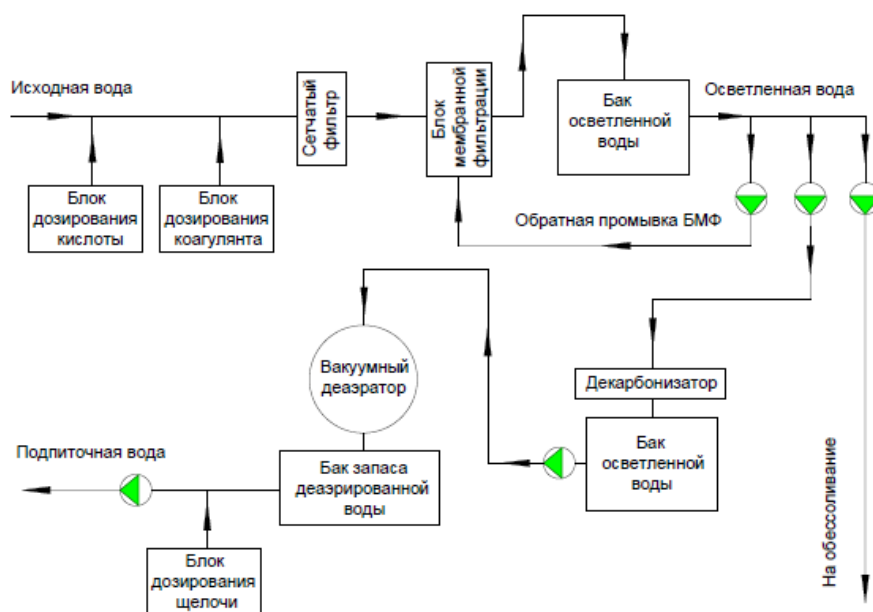


Рис. 2.3. Принципиальная схема установки подпитки теплосети на Казанской ТЭЦ-2

#### 2.4.2. Водно-химический режим тепловых сетей

При проектировании и эксплуатации теплофикационных систем серьезное внимание уделяется организации их рационального водно-химического режима. Он должен обеспечивать нормативные показатели качества добавочной и сетевой воды, поддержание которых должно предотвратить накипе- и шламообразование, а также коррозионные повреждения в оборудовании и по всему тракту сетей. Нормы на качество добавочной и сетевой воды установлены на основании исследований химических процессов, происходящих при нагревании воды, а также результатов многолетней эксплуатации теплофикационных систем разного типа. Нормативные показатели воды тепловых сетей даны в правилах технической эксплуатации (ПТЭ) и должны соблюдаться при эксплуатации любых тепловых сетей России.

Нормы качества подпиточной воды служат проектным организациям руководящим материалом при выборе схем водоподготовки для каждой конкретной теплосети (рис. 2.2). Практика эксплуатации тепловых сетей закрытого типа выявила необходимость учитывать при определении объема добавляемой в теплосеть воды (производительности химводоподготовки) как объем присоса необработанной воды через неплотности в подогревателях, так и потери воды из теплосети из-за неорганизованного водоразбора. Присосы и потери следует учитывать также при выборе качества исходной и схемы очистки подпиточной воды.

Если качество воды, добавляемой в теплосеть любого типа, определяется схемой установки водоподготовки и правильной ее эксплуатацией, а также нормальной работой деаэрационного узла, то качество сетевой воды во многом зависит от работы теплофикационного оборудования и подогревателей, находящихся во ведении потребителей и службы теплосети. Между тем безнакипная и вообще нормальная бесперебойная работа водогрейных котлов в той степени, в какой на нее влияет водно-химический режим, определяется качеством именно сетевой воды, поскольку в котел поступает как вода, возвращаемая от потребителей (вода обратной магистрали), так и вода, добавляемая для покрытия водоразбора и потерь в сети (открытая система) или только потерь (закрытая система). Снижение качества сетевой воды в результате присосов сырой воды и примесей, выносимых из местных отопительных приборов, оказывает отрицательное влияние на работу водогрейных котлов. Иначе говоря, забота о поддержании водно-химического режима в пределах норм, указанных в ПТЭ, является задачей не только работников ТЭЦ и районных котельных (источники тепла и воды), но и работников тепловых сетей, обслуживающих теплотрассы и тепловые пункты [23].

Одно из главных требований к процессу нагрева воды в системах теплоснабжения – отсутствие кипения. В то же время при применении в этих системах природной воды её нагрев почти всегда приводит к образованию накипи. Основным требованием накипеобразования является условие:

$$[Kt]^n \cdot [An]^m \cdot f_{Kt}^n \cdot f_{An}^m > \text{ПР}(Kt_n An_m),$$

где  $[Kt]$ ,  $[An]$  – концентрация катиона и аниона данной соли;  $f$  – коэффициенты активности этих ионов; ПР – произведение растворимости образующихся осадков. В настоящее время системы теплоснабжения обычно рассчитываются на температуры 150, 115 и 95 °С.



В этих условиях основными накипеобразователями являются  $\text{CaCO}_3$ ,  $\text{MgCO}_3$  и  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  (при высоком значении pH) [24].

Таблица 2.3

## Произведения растворимости

Температура, °C	25	100	150	200
$\text{PP}_{(\text{CaCO}_3)} \cdot 10^{-9}$	4,4	0,47	0,053	0,0043
$\text{PP}_{(\text{MgCO}_3)} \cdot 10^{-9}$	7900	98	5.2	3/0
$\text{PP}_{(\text{Mg}(\text{OH})_2)} \cdot 10^{-9}$	0,0066	0,0041	0,0013	0,00032
$\text{PP}_{(\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O})} \cdot 10^{-9}$	37000	19000	270	1,4

Наименьшую величину ПР имеет  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , но при pH, близком к 7, величина  $[\text{OH}^-]^2$  настолько мала ( $10^{-14}$ ), что твёрдая фаза  $\text{Mg}(\text{OH})_2$  не образуется. Величина pH влияет также на накипеобразование  $\text{CaCO}_3$ , так как при увеличении pH происходит переход  $\text{HCO}_3^-$  в  $\text{CO}_3^{2-}$ , и вероятность образования накипи  $\text{CaCO}_3$  увеличивается.

Из табл. 2.3 видно, что в первую очередь при прочих равных условиях образуется накипь из  $\text{CaCO}_3$ , а образование накипи из  $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$  сульфата кальция возможно при высоких концентрациях сульфатов или температурах значительно выше нормативных для системы. Процесс накипеобразования (кристаллизации) состоит из нескольких стадий:

1. Возникновение зародышей кристаллов. Сначала они неустойчивы и могут самопроизвольно растворяться.

2. Зародыш становится устойчивым.

3. Собственно кристаллизация. При размере кристаллов больше  $10^{-8}$ – $10^{-9}$  образуется устойчивая коллоидная система. При этом даже если:

$$[\text{Ca}^{2+}] \cdot [\text{CO}_3^{2-}] \cdot f_{\text{Ca}^{2+}} \cdot f_{\text{CO}_3^{2-}} \gg \text{PP}_{\text{CaCO}_3},$$

образование накипи отсутствует.

4. Дальнейший рост кристаллов и образование накипи.

Относительно слабые антيناкипины были известны достаточно давно (фосфаты). Они обычно применялись в системах с достаточно низкой температурой нагрева.

В теплоэнергетике наиболее широкое применение получили фосфоновые соединения.

Фосфонаты впервые были синтезированы за рубежом, и там же появились первые патенты на их использование в качестве ингибиторов. В СССР первые работы по синтезу и изучению свойств фосфонатов были начаты в ИНЭО АН СССР и ИРЕА в 1960–1970 годах. В системах теплоснабжения фосфонаты ИОМС, ОЭДФК, ОЭДФ-цинк начали применяться в СССР, начиная с 1990 года [25].

С 1995–1997 г.г. в СНГ появились фосфонаты СК-110, Композиция ККФ (данная композиция представляет собой двухкомпонентную систему, одним из компонентов является водный раствор оксиэтилидендифосфонатоцинката натрия; другой компонент – раствор модифицирующих полимеров природного происхождения) СК-110 и ККФ с добавлением полимеров более эффективные, чем предыдущие. Начиная с 2000–2003 г.г. появился фосфонат на основе новой для СНГ производной фосфоновой кислоты с добавлением диспергатора – Гилуфер 422, в 2009 и 2011 годах появились аналогичные фосфонаты – Акварезалт 1040 и АКВА 2020. Как показывает опыт, эти три фосфоната принципиально эффективнее, чем все ранее указанные [25].

Практика применения фосфонатов в СССР и СНГ свидетельствует о том, что их можно распределить по группам с точки зрения возможности нагрева сетевой воды. Такое распределение приведено в табл. 2.4.

Таблица 2.4

## Объединение фосфонатов в группы

Группа	Состав фосфонатов	Карбонатный индекс воды $I_k$ (мг-экв/л) <sup>2</sup>	Температура нагрева воды, °С
1	ИОМС-1 (натриевые соли amino-метиленфосфоновых кислот)	<8	130
1	ОЭДФК (1-гидроксиэтилиди-фо-сфоновая кислота)	<8	130
1*	ОЭДФ-цинк (цинковый комплекс динатриевой соли 1-гидроксиэтилидендифосфоновой кислоты)	<8	130
2	СК-110 (цинковый комплекс динатриевой соли 1-гидроксиэти-лидендифосфоновой кислоты и полимер акриловой кислоты)	<10	140
2	Композиция ККФ (цинковый комплекс динатриевой соли 1- гидроксид-этилидендифосфоновой кислоты и модифицированный крахмал)	<10	140
3	Гилуфер 422, Акварезалт 1040, АКВА 2040 (натриевые соли фосфотрикарбоново кислоты и диспергатор поликарбоксилат)	<11–13	170

1\* также относятся торговые марки АФОН, АМИНАТ, ОПТИОН, Акварезалт и др.

### 2.4.3. Механизм действия ингибиторов

При нагреве воды в процессе работы системы отопления происходит термический распад присутствующих в ней гидрокарбонат-ионов с образованием карбонат-ионов. Карбонат-ионы, взаимодействуя с присутствующими в избытке ионами кальция, образуют зародыши кристаллов карбоната кальция. На поверхности зародышей осаждаются все новые карбонат-ионы и ионы кальция, вследствие чего образуются кристаллы карбоната кальция, в котором часто присутствует карбонат магния в виде твердого раствора замещения. Осаждаясь на стенках теплотехнического оборудования, эти кристаллы срастаются, образуя накипь.

Основным компонентом, обеспечивающим противонакипную активность всех рассматриваемых ингибиторов, являются органофосфонаты – соли органических фосфоновых кислот. При введении органофосфонатов в воду, содержащую ионы кальция, магния и других металлов, они образуют весьма прочные химические соединения – комплексы. Во многие современные ингибиторы органофосфонаты входят уже в виде комплексов с переходными металлами, главным образом, с цинком. Комплексы органофосфонатов адсорбируются (осаждаются) на поверхности зародышей кристаллов карбоната кальция, препятствуя дальнейшей кристаллизации карбоната кальция и осаждения их на поверхности в виде накипи, т.е. они не способны образовывать плотноупакованные прочные отложения. Поэтому при введении в воду 1–10 г/м<sup>3</sup> органофосфонатов накипь не образуется даже при нагревании очень жесткой воды.

Комплексы органофосфонатов способны адсорбироваться не только на поверхности зародышей кристаллов, но и на металлических поверхностях. Образующаяся тонкая пленка затрудняет доступ кислорода к поверхности металла, вследствие чего скорость коррозии металла снижается. Однако наиболее эффективную защиту металла от коррозии обеспечивают ингибиторы на основе комплексов органических фосфоновых кислот с цинком и некоторыми другими металлами, которые были разработаны и внедрены в практику профессором Ю.И. Кузнецовым. В приповерхностном слое металла эти соединения способны распадаться с образованием нерастворимых соединений гидроксида цинка, а также комплексов сложной структуры, в которых участвует много атомов цинка и железа. В результате этого образуется тонкая, плотная, прочно сцепленная с металлом пленка, защищающая металл от коррозии. Степень защиты металла от коррозии при использовании таких ингибиторов может достигать 98 %.

Современные препараты на основе органофосфонатов не только ингибируют солеотложения и коррозию, но и постепенно разрушают застарелые отложения накипи и продуктов коррозии. Это объясняется образованием в порах накипи поверхностных адсорбционных слоев органофосфонатов, структура и свойства которых отличаются от структуры кристаллов накипи. Возникающие при эксплуатации системы отопления колебания и градиенты температуры приводят к расклиниванию кристаллических сростков накипи. В результате накипь разрушается, превращаясь в тонкую взвесь, легко удаляемую из системы. Поэтому при введении препаратов, содержащих органофосфонаты, в системы отопления с большим количеством застарелых отложений накипи и продуктов коррозии, необходимо регулярно спускать отстой из фильтров и грязевиков, установленных в нижних точках системы. Спуск отстоя следует производить в зависимости от количества отложений 1–2 раза в сутки из расчета подпитки системы чистой, обработанной ингибитором водой в количестве 0,25–1 % водного объема системы в час. Необходимо отметить, что при повышении концентрации ингибитора свыше 10–20 г/м<sup>3</sup> накипь разрушается с образованием весьма грубых взвесей, способных забить узкие места системы отопления. Поэтому передозировка ингибитора в этом случае грозит засорением системы. Наиболее эффективная и безопасная очистка систем отопления от застарелых отложений накипи и продуктов коррозии достигается при использовании препаратов, содержащих поверхностно-активные вещества, например, композиции ККФ [26].

## **2.5. Водно-химический режим барабанных котлов**

ВХР барабанных котлов предусмотрен щелочным. Щелочная реакция достигается за счет фосфатирования или аммианирования питательной воды; ввод NH<sub>3</sub> ограничен до 1000 мг/дм<sup>3</sup>; предусматривается также обработка питательной воды гидразином с избыточными концентрациями в пределах 30–100 мг/дм<sup>3</sup> в периоды пусков и до 300 мг/дм<sup>3</sup> в периоды остановов.

### ***2.5.1. Характеристика водно-химических режимов барабанных котлов***

Правильная подготовка и водный режим ТЭС определяют безаварийную работу котлов и турбин, обусловленную отсутствием отложений, накипи, шлама растворимых солей и явлений коррозии в этих

агрегатах и во всем пароводяном тракте ТЭС. Все барабанные котлы работают с гидразинным дообескислороживанием. Из-за большого диаметра барабанов, циклонной сепарации, промывки пара питательной водой и сравнительно небольшого содержания солей в котловой воде, отложения растворимых солей в пароперегревателях, паропроводах и в проточной части турбин практически отсутствуют (табл. 2.5).

Однако отложения шлама и накипи в барабанных котлах высокого и сверхвысокого давления все же возникают. При несвоевременных химических промывках, а также при нарушении теплового и гидравлического режима эти отложения приводят к перегревам и разрывам экранных труб, преимущественно в зоне ядра факела и в солевых, продувочных отсеках. В отложениях присутствуют оксиды железа и меди, металлическая медь и соединения кальция, магния и цинка, кремниевая кислота. В барабанных котлах высокого и сверхвысокого давления возникают следующие отклонения:

1. В экономайзерах, барабанах, на питательных устройствах и в отпускных трубах откладываются отложения оксида железа, в небольших количествах – оксид кремния, фосфаты кальция, магния и меди.

2. В экранных трубах чистых отсеков откладываются отложения оксида железа и меди, фосфаты кальция, магния, цинка, кремниевая кислота. На обогреваемых сторонах труб возникает пароводяная коррозия. На поверхности металла образуется слой магнетита  $Fe_3O_4$ .

3. В экранных трубах солевых продувочных отсеков возникают отложения примерно того же состава, что и в чистых отсеках, но в больших количествах.

Таблица 2.5

## Нормы качества воды и пара для барабанных котлов

№ №		Нормируемые показатели (не более)																
		Ж <sub>о</sub>	Щ <sub>г</sub>	SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Fe <sup>3+</sup>	NH <sub>3</sub>	N <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Cu <sup>2+</sup>	O <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	Окисл.	УЭП	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Нефте- -пр.	CO <sub>2</sub>	Взв. вещ.	pH
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	Питательная вода	1,0		60	20	1000	20–60	5,0	10	20	50		1,5		0,3			9,0+0,1
2	Котловая вода ч/о		Щ <sub>фф</sub> = =(0,2–0,5)Щ <sub>общ</sub>	2500										0,5–2				9,0–9,5
3	Котловая вода с/о		Щ <sub>фф</sub> = =(0,2–0,5)Щ <sub>общ</sub>	25000										12				10,5
4	Насыщенный пар			25							5		1,0					>7,5
5	Перегретый пар перед турбиной			25							5		1,0					>7,5
6	Обессоленная вода	1,0		100	20			5,0			80		2,0					
7	Очищенный конденсат	1,0			20			5,0						0,3				
8	Конденсат ТГ	1,0		60	20			5,0	20									
9	Конденсат подогр. и бойлеров	1,0		60	20			5,0								отс.		
10	Деаэраторы НД								30									
11	Деаэраторы ВД								10									
12	БНТ	1,0		60	20									0,3				

Окончание табл. 2.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
13	Конденсат дренажного бака	1,0		60	20										0,3			
14	БЭК	1,0		100	20													
15	Конденсат с КТЦ	50		100														
16	Конденсат с мазут. хозяйства	50		100	100	1000		20				1,5			10			8,5–9,2
17	Подпиточная вода для теплосети								50						1,0	отс.	5	8,3–9,5
18	Дистиллят охлаждения статора генератора							100	400				5,0					8,5+0,5
19	Сетевая вода				500				20						1,0	отс.	5	8,3–9,5
20	Конд. испарител.	1,0		60	20						100					2,0		
21	Питательная вода испарителей	30							30							отс.		

Методы и схемы подготовки добавочной воды в цикле ВПУ и очистки возвращаемого на ТЭЦ производственного конденсата потребителей, а также средства коррекции должны обеспечивать выполнение норм качества питательной воды, регламентируемых ПТЭ [1] для конкретных рабочих параметров котлов.

Состав, структура, физические свойства отложений в котлах зависят в основном от химического состава и температуры котловой воды. В свою очередь, химический состав котловой воды определяется питательной водой и применяемыми методами коррекционной обработки. Температура котловой воды определяется рабочими параметрами и конструктивными особенностями котлов, а также видом сжигаемого топлива. Эти факторы влияют на локальные тепловые потоки экранной системы, неравномерность тепловых потоков присуща котлам, работающим на жидком топливе и оборудованным мощными горелочными устройствами.

К физико-механическим показателям отложений относятся пористость, твёрдость, теплопроводность. Пористые отложения малотеплопроводны, легко удаляются при промывках; твёрдые плотные отложения трудно удаляются при очистке, теплопроводность их зависит от структуры и химического состава. Теплопроводные отложения менее опасны с точки зрения перегрева металла. Снижение пористости отложений на поверхностях нагрева может быть обусловлено кристаллизацией солей из пересыщенных растворов, седиментацией органических и минеральных коллоидных растворов, электрохимическим восстановлением веществ, высокотемпературными топохимическими процессами на поверхности металла. В формировании отложений участвует комплекс процессов.

### ***2.5.2. Методы повышения чистоты пара***

Примеси в насыщенный пар могут попадать с уносом влаги и вследствие растворимости их в паре. Чистоту насыщенного пара барабанных котлов можно повысить путем снижения содержания солей в воде, контактирующей с паром перед его поступлением в пароперегреватель. Вынос примесей вследствие их растворения в насыщенном паре наблюдается при любых давлениях, но значения этого выноса зависят от растворимости примесей в паре.

Унос влаги насыщенным паром характерен для барабанных котлов любых давлений. Причём для котлов среднего давления, в связи с низкой растворяющей способностью парового раствора, унос влаги – практически



единственный путь поступления примесей в насыщенный пар. Для котлов высокого давления унос влаги является одним из путей загрязнения насыщенного пара. В связи с этим сепарация влаги из пара является непременным условием получения чистого пара барабанных котлов.

Влажность насыщенного пара зависит от многих конструкционных и эксплуатационных факторов, прежде всего от состава котловой воды, значения парового объёма, напряжённости зеркала испарения, давления и характера нагрузки котла. Оптимальные значения перечисленных показателей определяются теплотехническими испытаниями котлов.

Для котлов высокого давления чистота насыщенного пара определяется качеством воды, подаваемой на паропромывочное устройство. Это определяется поведением кремниевой кислоты, её способностью к «избирательному уносу» паром. Значит, для получения чистого пара высокого давления необходимо иметь относительно низкое солесодержание, содержание кремниевой кислоты и других составляющих питательной воды, контактирующей с паром на промывочном устройстве.

Подготовку добавочной воды для котлов высокого давления ведут методом термического или химического обессоливания. Качество котловой воды регулируют организацией продувки, а также ступенчатого испарения для обеспечения экономически приемлемых размеров продувки.

Метод ступенчатого испарения позволяет при сниженном значении продувки котла обеспечить получение чистого пара. Схема ступенчатого испарения предусматривает разделение барабана и экранной системы котла на отдельные отсеки с последовательным поступлением в них питательной и котловой воды. Солевой состав воды по отсекам изменяется от меньшего к большему, а отвод насыщенного пара производится только из чистого отсека. Пар солевых отсеков поступает в паровое пространство чистого отсека и вместе с общим потоком пара чистого отсека проходит завершающую ступень сепарации перед выходом в пароперегреватель.

Водяной объём смежных отсеков соединен короткими трубами, и переток воды в последующий отсек достигается за счёт разности уровней в них. Навстречу потоку воды от последнего отсека к первому движется поток пара, а разница в смежных отсеках должна быть равна сумме сопротивлений перетоку воды и пара между отсеками. Число отсеков обычно не превышает трёх. Причём третий отсек (ступень) в этом случае размещают в выносных циклонах, а первые две ступени – в барабане (рис. 2.4) [5].

В барабанных котлах одновременно с образованием пара из пароводяной смеси происходит концентрирование котловой воды. Для поддержания концентрации солей котловой воды в пределах нормы производится постоянно вывод солей и взвешенных примесей из контура

циркуляции путем непрерывной продувки. Продувочная вода выводится из последней ступени испарения.

В котлах с двусторонним ступенчатым испарением непрерывная продувка может осуществляться с каждой стороны самостоятельно или из линии выравнивания концентрации котловой воды между отсеками.

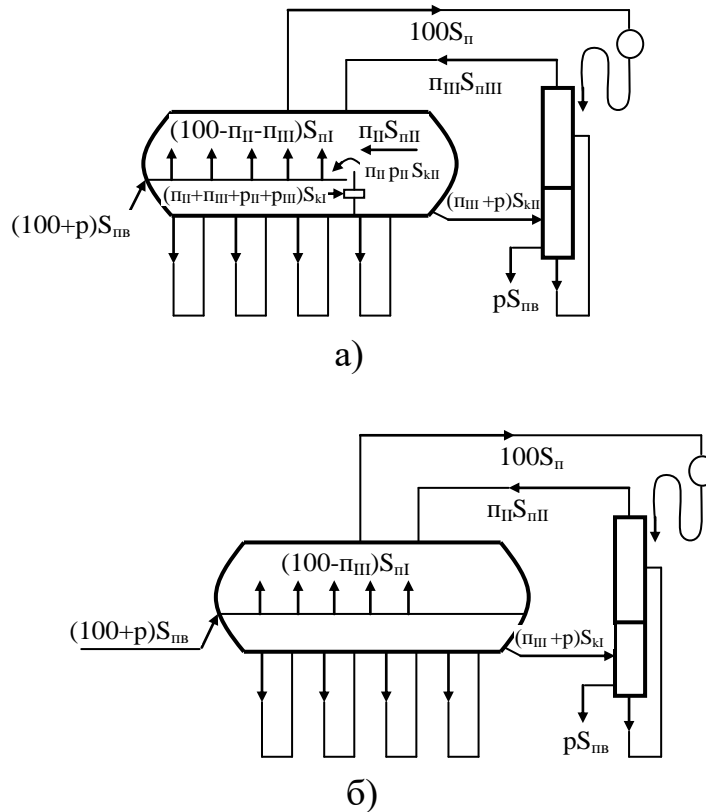


Рис. 2.4. Схема двух и трехступенчатого испарения котла с выносными циклами: *а* – с внутрибарабанной сепарацией второй ступени и сепарацией пара в выносном цикле третьей ступени; *б* – с сепарацией пара в выносных циклонах второй ступени; *p* – продувка котла; *n* – поток пара; *пв* – питательная вода; *к* – котловая вода; *S* – ступени испарения; *I* – первая ступень; *II* – вторая ступень; *III* – третья ступень

Одним из источников загрязнения насыщенного пара барабанных котлов является унос паром капелек котловой воды. При работе котла с паром уносятся мелкие капли влаги, с увеличением нагрузки процесс уноса интенсифицируется. Образование мелких капель происходит из-за разрыва единичных паровых пузырей при малой нагрузке зеркала испарения. С повышением паровой нагрузки возникает унос крупных капель за счет дробления влаги, поступающей в барабан со струями пара. Более крупные капли могут подниматься высоко за счёт начальной кинетической энергии. Мелкие капли быстро теряют свою начальную энергию и падают на зеркало испарения. Определяющим фактором для влажности пара является нагрузка зеркала испарения. Вместе с тем при

данной нагрузке зеркала испарения влажность пара зависит от объёма парового пространства, скорости ввода пароводяной смеси в барабан и соотношения воды и пара в этой смеси. Для снижения уноса влаги в барабанных котлах организуют сепарацию пара. Основная задача сепарации – получение пара с минимально возможным содержанием влаги [5].

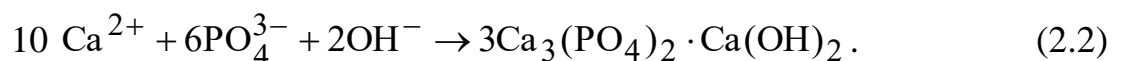
### **2.5.3. Коррекционные режимы котловой воды**

Одной из основных задач водно-химического режима является создание таких условий, при которых процессы кристаллизации и образования отложений в экранной системе имели бы минимальные скорости.

#### **2.5.3.1. Фосфатирование котловой воды**

В питательной воде присутствуют вещества, имеющие ограниченную растворимость. Это соединения кальция, магния, оксиды железа, меди, цинка и алюминия. В котлах из-за испарения воды, концентрация растворённых в ней солей увеличивается, некоторые из них выпадают в виде твердой фазы на поверхности металла или в виде шлама в объёме котловой воды. Силикат кальция, сернокислый кальций, гидроксид магния, фосфат магния выделяются из котловой воды, образуя накипь. Карбонат кальция, гидроксилпатит, силикат магния выделяются в виде шлама.

Для предотвращения образования кальциевых накипей на поверхностях нагрева барабанных котлов проводят фосфатную обработку котловой воды. Ввод фосфатов обеспечивает перевод кальциевых соединений в шламовую форму. В результате взаимодействия ионов  $\text{PO}_4^{3-}$  с ионами  $\text{Ca}^{2+}$  образуется гидроксилпатит  $[\text{Ca}(\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2)_3](\text{OH})_2$  в виде тончайшей взвеси (шлама). В отличие от гидроксилпатита в котловой воде возможно образование фосфорита  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ , который выделяется на металле в виде твердой накипи. Условия образования накипи и шлама определяются значением pH среды. Раствор фосфата вводится не в питательную, а непосредственно в котловую воду, так как образование гидроксилпатита происходит в щелочной среде котловой воды:



Образующийся гидроксилпатит является шламом. Для более полного протекания реакции связывания всех ионов  $\text{Ca}^{2+}$  в гидроксилпатит при упаривании воды в парообразующей системе необходимо создать в воде избыточную концентрацию  $\text{PO}_4^{3-}$ . В условиях сложного состава котловых вод, содержащих  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{SiO}_3^{2-}$ , точный расчет необходимой концентрации  $\text{PO}_4^{3-}$  невозможен, так как следует иметь в виду, что жёсткость питательной воды определяется содержанием в ней не только катионов кальция, но и катионов магния, представляющие собой накипь в виде фосфата магния.

Из числа магниевых соединений шламом являются  $\text{MgSiO}_3$ ; избыток  $\text{PO}_4^{3-}$  может привести к образованию накипи  $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$ . При избытке в котловой воде ионов  $\text{PO}_4^{3-}$  образуется малорастворимое соединение, и концентрация ионов кальция снижается настолько, что котловая вода не достигает состояния насыщения по отношению к таким накипеобразователям, как  $\text{CaSiO}_3$ ,  $\text{CaSO}_4$ . В результате весь кальций, поступающий в котловую воду, осаждается в ней в виде гидроксилпатита в форме шлама.

Концентрация ионов кальция в этом соединении находится в обратной зависимости от концентрации ионов  $\text{PO}_4^{3-}$ :

$$[\text{Ca}^{2+}] = K_1 [\text{PO}_4^{3-}]^{\lambda-},$$

где  $K_1$  и  $\lambda$  – некоторые параметры.

Возможность образования твёрдой накипи может быть исключена, если концентрация  $\text{PO}_4^{3-}$  в котловой воде удовлетворяет неравенствам, выведенным применительно к любому накипеобразующему аниону.

Такие условия достигаются, если в котловой воде между концентрациями анионов накипеобразователей  $\text{SiO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и концентрацией  $\text{PO}_4^{3-}$  созданы соотношения:

$$[\text{PO}_4^{3-}] > R_1 [\text{SiO}_3^{2-}]^{r_1},$$

$$[\text{PO}_4^{3-}] > R_2 [\text{SO}_4^{2-}]^{r_2},$$

где  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $r_1$ ,  $r_2$  – некоторые эмпирические параметры.

В связи со сложным составом котловой воды, содержащей наряду с катионами  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  и анионы  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{SiO}_3^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ , расчет потребной концентрации ионов для фосфатной обработки выполнить практически невозможно. В котловой воде должна быть достаточная щелочность, чтобы происходило образование гидроксилапатита, и в то же время не должно быть большого избытка  $\text{PO}_4^{3-}$ , чтобы избежать образования твёрдой фазы накипи  $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$  и  $\text{Fe}_3(\text{PO}_4)_2$ . Обычно в условиях эксплуатации правильность выбора дозы ионов  $\text{PO}_4^{3-}$  проверяется по химическому составу отложений на трубах экранной системы. В составе отложений содержание  $\text{PO}_4^{3-}$  не должно превышать сумму ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ . В противном случае доза ионов  $\text{PO}_4^{3-}$  при фосфатной обработке велика, и её следует уменьшить.

Для уменьшения количества шлама в котловой воде следует стремиться к максимально возможному снижению жесткости питательной воды и обеспечению равномерного и непрерывного ввода раствора фосфата в котловую воду.

В соответствии с расчетными данными, количество фосфатов, обеспечивающих безнакипный режим котловой воды, увеличивается с увеличением солесодержания и уменьшается при увеличении рН. Этот регламент позволяет иметь низкое содержание  $\text{PO}_4^{3-}$  в котлах высокого давления, в связи с малой концентрацией анионов накипеобразователей в котловой воде, а также иметь низкое содержание фосфатов в котлах среднего давления, в связи с повышением значением рН котловой воды.

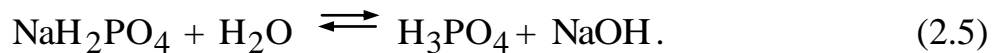
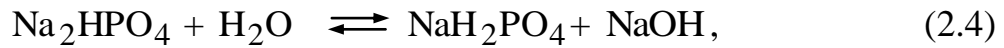
Длительная эксплуатационная проверка режимов фосфатирования на электростанциях подтвердила возможность и целесообразность режима уменьшенного фосфатирования для котлов как высокого, так и среднего давления. Режим уменьшенного фосфатирования снижает скорость образования железофосфатных накипей, вследствие незначительной концентрации фосфатов, а также уменьшает интенсивность концентрации фосфатов и уменьшает интенсивность коррозии труб экранной системы.

В действующих нормах ПТЭ щелочно-фосфатное соотношение регламентируется:

$$\text{Щ}_{\text{общ}} \cdot 40 < 0,84 \cdot C_{\text{PO}_4^{3-}},$$

где  $\text{Щ}_{\text{общ}}$  – общая щелочность добавочной воды, мг-экв/дм<sup>3</sup>;  
 $C_{\text{PO}_4^{3-}}$  – концентрация фосфатов, мг-экв/дм<sup>3</sup>.

Механизм фосфатирования определяется гидролизом вводимого тринатрийфосфата:



Фосфатный режим не учитывает особенностей формирования оксидных отложений в экранной системе котлов. В составе отложений 50 % оксидов железа, следовательно, необходима некоторая коррекция фосфатирования, направленная на снижение скорости коррозии. Для снижения скорости коррозии фосфатирование ведут смесью тринатрийфосфата с едким натром. Подщелачивание проводят вводом щелочи в рабочий раствор тринатрийфосфата. Дозу NaOH подбирают опытным путем и корректируют по сезонам года. Особая необходимость в подщелачивании котловой воды возникает в том случае, когда питательная вода содержит органические загрязнения, которые в процессе термолиза в котле образуют кислые продукты. Как следствие, при снижении щелочности котловой воды идёт интенсивное образование отложений на поверхности экранных труб, не исключается и коррозионное разрушение металла.

Влияние pH на содержание железа в котловой воде при фосфатировании рассматривалось в двух режимах: первый режим – тринатрийфосфатный, второй – тринатрийфосфатный с добавлением щелочи. Влияние pH на содержание железа в котловой воде наглядно отражено на графике (рис. 2.2), где приведены данные по pH и содержанию железа котловой воды котла ТГМ-96 двух периодов [5]. В первом случае фосфатирование котлов проводилось только тринатрийфосфатом, во втором – тринатрийфосфатом с добавлением щелочи. При сопоставляемых значениях содержания железа в питательной воде одинаковы, а при избытках фосфат-ионов в котловой воде значения pH сильно отличаются. Более благоприятным оказался режим с добавлением щелочи, когда в котловой воде удерживается больше железа и, следовательно, больше удаляется с продувкой. Регламент щелочно-фосфатного режима:

$$0,84 \cdot C_{\text{PO}_4^{3-}} < \text{Щ}_{\text{общ}} \cdot 40 < 1,18 \cdot C_{\text{PO}_4^{3-}}.$$

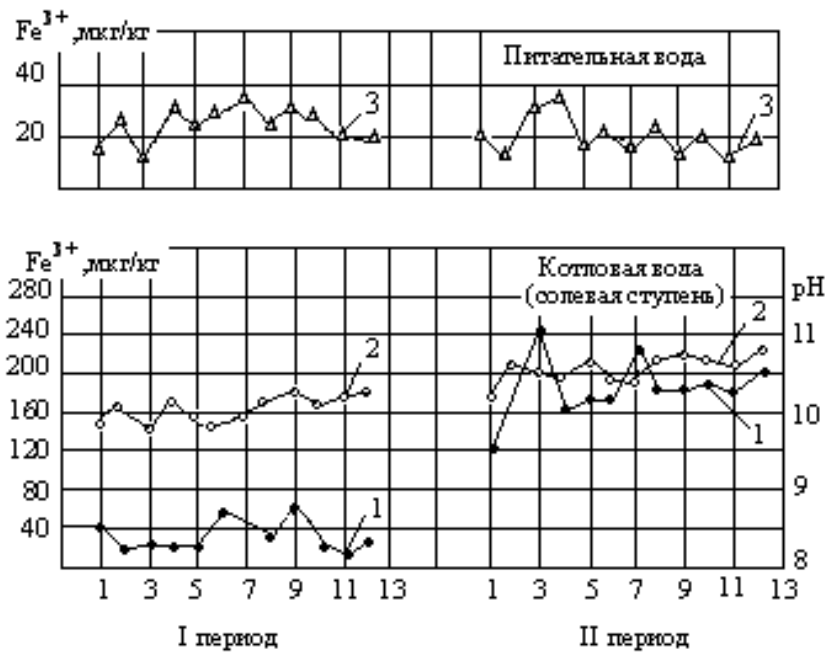


Рис. 2.5. Зависимость содержания  $\text{Fe}^{3+}$  от значения pH котловой воды: 1 – содержание железа в котловой воде; 2 – значение pH котловой воды; 3 – содержание железа в питательной воде

На всех электростанциях энергосистемы надёжно работает схема индивидуально-группового дозирования раствора фосфата. В этой схеме дозирование раствора ведётся одним насосом на все однотипные котлы. Эта схема стабилизирует режим по избытку фосфатов в котловой воде при сокращении количества насосов-дозаторов.

### 2.5.3.2. Комплексонная обработка питательной воды

Наряду с фосфатированием для коррекции питательной воды барабанных котлов применяют комплексонную обработку. В качестве комплексообразователей могут быть использованы этилендиаминтетрауксусная кислота (ЭДТА) или её натриевые соли, трилон Б, хеламин.

Применение фосфатирования для коррекционной обработки котловой воды не предотвращает образование накипи ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ). Поэтому этот метод стоит рассматривать как оптимальный водно-химический режим для котлов среднего и высокого давления.

В котлах высокого давления из-за низкой щелочности котловой воды возможно образование фосфорита  $\text{Ca}_6\text{P}_2\text{O}_8$ , который в сочетании с оксидами железа образует железофосфатную накипь. Интенсивное накипеобразование железофосфатной накипи наблюдается в экранных

поверхностях котлов, сжигающих жидкое и газообразное топливо, где из-за высоких тепловых напряжений фосфатирование малоэффективно с точки зрения безнакипного режима работы. В таких случаях целесообразно применение комплексонной обработки.

ЭДТА даёт комплексы со всеми катионами, присутствующими в питательной воде котлов. Прочность этих комплексов зависит от природы катионов, рН и температуры раствора. В процессе обработки происходит комплексообразование катионов кальция, магния, железа, меди. При комплексонной обработке в котловой воде отсутствует железоксидный шлам, уменьшается вынос железа насыщенным паром, улучшается водный режим. Прочность внутрикомплексных соединений характеризуется константой нестойкости. Чем более устойчив комплекс, тем выше значение рК. Комплексообразование происходит в экономайзерах, и в котёл поступают комплексонаты, где происходит их разложение тем более полное, чем выше температура. Комплексонаты растворены в котловой воде и выводятся из котла с продувкой. Расход комплексона на обработку котловой воды  $q_{\text{ЭДТА}}$ , г/г:

$$q_{\text{ЭДТА}} = (186 \cdot J_0 + 6,7 \cdot C_{\text{Fe}^{3+}} + 6 \cdot C_{\text{Cu}^{2+}}) \cdot D_{\text{п}} \cdot 10^{-3},$$

где  $D_{\text{п}}$  – паропроизводительность котла, т/ч;  $J_0$  – жесткость питательной воды, мг·эquiv/дм<sup>3</sup>;  $C_{\text{Fe}^{3+}}$  – содержание Fe<sup>3+</sup> в питательной воде, мкг/дм<sup>3</sup>;  $C_{\text{Cu}^{2+}}$  – содержание Cu<sup>2+</sup> в питательной воде, мкг/дм<sup>3</sup>.

Количество вводимого комплексона должно быть строго расчётным в соответствии с качеством питательной воды, так как при этом не исключено взаимодействие избытка комплексона с отложениями на поверхности металла, а при их отсутствии – с самим металлом. Для снижения коррозионной активности раствора комплексона и повышения рН котловой воды применяют четырёхзамещенную натриевую соль ЭДТА. Скорость, глубина термического разложения комплексонатов зависят от параметров работы котла. В котлах с давлением 5 мПа основная часть комплексонатов растворена в котловой воде, при давлении более 11 мПа в котловой воде происходит полное разложение комплексонатов, и эффективность продувки по выводу загрязняющих примесей меньше.

В условиях комплексонной обработки осаждение продуктов термолитиза происходит равномерно по всей поверхности, но эти отложения



не опасны с точки зрения перегрева. В ряде работ А. Вайнмана проводились исследования по проверке надёжности щелочно-комплексонного режима, в котором исследуется трилон Б с добавлением NaOH. Оптимальные условия щелочно-комплексонного режима достигаются при значении  $pH = 10,2-11,0$ .

Применение щелочно-комплексонного режима является наиболее простым и эффективным средством предупреждения коррозии экранных труб. Наличие в котловой воде избытка едкого натра предупреждает также отложения соединений кремния на парообразующей поверхности. Повышенная щелочность котловой воды предупреждает нежелательные последствия при проскоках в питательную воду потенциально кислых продуктов (органических веществ) и соединений кремниевой кислоты.

Наличие в котловой воде едкого натра помогло снять имеющиеся затруднения комплексонной обработки. Возросла термическая стойкость комплексона и комплексонатов, вместо трилона Б в котловую воду дозируется натриевая соль ЭДТА.

При проведении комплексонного режима необходимо учитывать следующее:

1. До проведения комплексонного режима требуется проводить химическую очистку экранной системы котла от отложений.
2. При повышении жесткости питательной воды увеличивается доза комплексона на основании стехиометрического соотношения для фактической жесткости.
3. Раствор комплексона и едкого натра вводят в узел сниженного питания котла регулирующими клапанами.
4. Режим комплексонной обработки не исключает коррекции питательной воды в соответствии с нормами ПТЭ.
5. При комплексонной обработке содержание водорода в насыщенном паре выше, чем при фосфатной обработке за счет термолиза ЭДТА.

Схема приготовления и дозирования рабочего раствора трилона Б (рис. 2.3) включает: бак для приготовления концентрированного раствора, бак для рабочего раствора, насос-дозатор и перекачивающие насосы, бак-мерник раствора едкого натра NaOH. Бак раствора трилона Б должен быть изготовлен из нержавеющей стали или углеродистой стали с антикоррозионным покрытием. Раствор комплексона следует вводить в трубопровод питательной воды за регулирующим клапаном. Раствор вводят зондом в середину потока на прямом участке трубопровода [5].

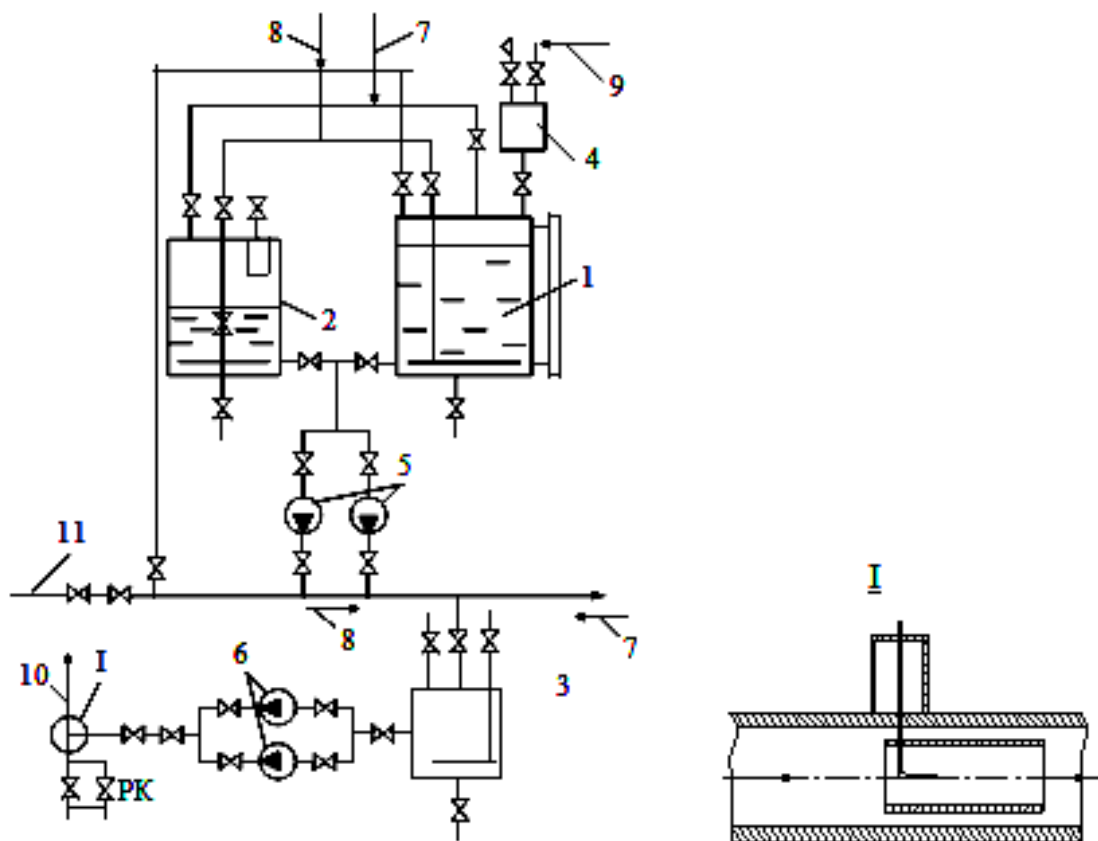


Рис. 2.5. Принципиальная схема приготовления и дозирования трилона Б в котле:  
 1 – бак концентрированного раствора трилона Б; 2 – бак рабочего раствора трилона Б для пассивации; 3 – бак-мерник рабочего раствора трилона Б; 4 – бак-мерник щелочи; 5 – перекачивающие насосы; 6 – насосы-дозаторы; 7 – сжатый воздух; 8 – обессоленная вода; 9 – щелочь; 10 – экономайзер; 11 – линия заполнения котлов;  
 РК – регулирующий клапан

В качестве комплексообразователя может быть использован хеламин.

Хеламин представляет собой жидкий продукт желтоватого цвета, неограниченно растворимый в воде, являющийся смесью алифатических моно- и полиаминов различной степени летучести общей формулой  $R[NH(CH_2)_3]_X NH_2$ , где  $R = C_{12} \dots C_{20}$ ,  $X = 1 \dots 7$ . Температура замерзания хеламина  $-1 \text{ }^\circ\text{C}$ , температура горения – более  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ . Хеламин обладает специфическим аминовым запахом. Плотность его составляет  $0,99 \text{ г/см}^3$ . Водная эмульсия хеламина щелочная с  $pH = 11,5 \pm 1$ .

Некоторые марки хеламина содержат также и поликарбоксилаты, циклогексиламин, этаноламин. При взаимодействии с теплоносителем хеламин не повышает его солесодержание и, по данным фирмы изготовителя, не оказывает негативного воздействия на ионообменные смолы.

Хеламин, обладая мощным эффектом ПАВ, образует на металлических поверхностях оборудования защитную гидрофобную пленку, препятствующую контакту металла стальных и медьсодержащих сплавов с агрессивной средой. Помимо антикоррозионного действия полиаминовая пленка предотвращает нарастание кристаллов накипеобразователей на поверхности металла, особенно в областях напряженного теплообмена. Также предотвращается отложение продуктов коррозии, поступивших в котел, а ранее образованные отложения постепенно разрушаются, переходят в мелкодисперсный шлам и удаляются с продувкой. Кроме того, в условиях высоких температур на поверхностях нагрева котлов хеламин способствует образованию на поверхности металла защитного слоя магнетита ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) взамен рыхлого коррозионно-проницаемого слоя ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ).

Поликарбонат, содержащийся в хеламине, вследствие гидролиза приводит к независимому от температуры подщелачиванию водной, паровой и конденсатной среды. В качестве полиэлектролита он, как слабокислый ионообменник, обладает большим сродством к двух- и трехвалентным катионам. В результате образуются более стабильные соли кальция и железа, удаляемые с продувкой котла. Соли жесткости в стехиометрических пределах сохраняются в растворенном виде, а при превышении этих пределов выделяются в неприкипающий мелкий шлам. Кроме того, пленкообразующие амины вызывают разрыхление и удаление ранее отложившихся продуктов коррозии в виде тонкодисперстного шлама, который должен эффективно выводиться с продувкой котла.

Циклогексиламин и этаноламин относятся к летучим ингибиторам коррозии черных металлов в кислых и нейтральных средах. Циклогексиламин – ингибитор пароконденсатных сред анодного действия, практически не вызывает коррозии меди и медных сплавов.

Высокая стабильность хеламина к воздействию давления и температуры (до 550–590 °С), способность переходить в парообразное состояние без разложения позволяют обеспечивать защиту от коррозии поверхностей, контактирующих с паром (пароперегреватели котлов, проточная часть турбины, паровое пространство теплообменников).

Образующаяся на поверхностях теплообмена защитная гидрофобная пленка турбулизирует тепловой пристеночный поток, приводя к росту теплоотдачи, а снижение поверхностного натяжения жидкости улучшает гидродинамику потока, что повышает надежность и экономичность работы оборудования.

Максимальный технологический и экономический эффекты достигаются при строгом соблюдении рекомендованных по результатам анализа котловой воды концентрацией препарата HELAMIN 9012 Н. Растворенный в холодной воде до 5–10 %-ной концентрации исходного продукта HELAMIN 9012 Н дозируется в питательную воду сразу за термическим деаэратором, но перед питательным насосом. Параллельная работа дозирующего и питательного насосов является наиболее выигрышной схемой подачи.

Дозирование хеламинового раствора в систему горячей воды зависит от схемы разводки последней. В сложных случаях кроме дозировки в основную линию можно использовать также многоточечный впрыск.

Концентрация HELAMIN 9012 Н в питательной, котловой воде и конденсате измеряется поставляемым вместе с ингибитором полиамин-тестом, а в лабораторных условиях – фотометрическим способом.

Опыт электростанций, работающих на хеламинном водно-химическом режиме, показал следующие значительные его преимущества перед традиционным фосфатным, гидразинно-аммиачным режимами:

- возможность поддержания нормативных показателей качества питательной, котловой воды и пара с помощью одного реагента-хеламина при значительном снижении солесодержания в котловой воде и содержания железа в конденсате в конденсатах и котловой воде;

- значительное упрощение для эксплуатационного персонала ведения водно-химического режима, так как дозировка хеламина для всех работающих котлов ведется в одну точку – обессоленную воду;

- высокие защитные свойства пленок на металле при ускоренном их формировании на оборудовании, отсутствие роста отложений на поверхностях нагрева;

- значительное снижение величины непрерывной продувки котлов;

- улучшение технико-экономических показателей работы котлов.

### *2.5.3.3. Гидразинно-аммиачный водно-химический режим*

Присутствие в питательной воде коррозионно-активных агрессивных газов  $O_2$  и  $CO_2$  обуславливает её загрязнение продуктами коррозии конструкционных материалов. Поступление кислорода и угольной кислоты в питательный контур осуществляется с добавочной водой, присосами охлаждающей воды, а также присосами воздуха в вакуумной части конденсаторов турбин, ПНД и сливных насосов.  $O_2$  и  $CO_2$  удаляются в деаэраторах питательной воды, а также вентиляцией и отсосами из теплообменных аппаратов тепловой схемы.

Из воды в пар переходят  $\text{NH}_3$  и  $\text{CO}_2$ , которые удаляются из котла. В котловой воде остаётся не более 10–15 % аммиака, введенного с питательной водой, причём часть его удаляется продувкой.

В перегретом паре  $\text{NH}_3$  и  $\text{CO}_2$  существуют отдельно, а при конденсации пара они взаимодействуют с образованием карбоната аммония. В результате этого достигается полное исключение или существенное снижение скорости углекислотной коррозии.

В тепловой схеме ТЭС  $\text{NH}_3$  и  $\text{CO}_2$  непрерывно удаляются в деаэраторах, с отсосом паровоздушной смеси из конденсаторов и тепло-обменных аппаратов. Для поддержания на уровне  $\text{pH } 9,1 \pm 0,1$  единиц необходима непрерывная подача аммиака в питательный контур. Повышенное содержание аммиака (более  $1000 \text{ мкг/дм}^3$ ) в конденсате ПНД турбин ускоряет коррозионное разрушение латуни трубной системы этих аппаратов, особенно в присутствии кислорода. Из питательной воды  $\text{CO}_2$  должен быть максимально удалён. Свободная углекислота переходит из свободного состояния в связанные формы  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{CO}_3^{2-}$ . При упаривании воды в котле  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{CO}_3^{2-}$  гидролизуются, и образуется  $\text{CO}_2$ , который удаляется с насыщенным паром. В процессе конденсации пара часть  $\text{CO}_2$  переходит из паровой фазы в жидкую. Из паровой фазы  $\text{CO}_2$  удаляется отсосом парогазовой смеси из парового пространства конденсатора, а  $\text{CO}_2$  в конденсате турбины способствует протеканию коррозии конденсатно-питательного тракта (КПТ). В результате коррозии повреждаются поверхности оборудования, а питательная вода обогащается продуктами коррозии конструкционных материалов.

При аммиачном водно-химическом коррекционном режиме содержание аммиака в питательной воде не должно превышать  $1000 \text{ мкг/дм}^3$ , а содержание кислорода в турбинном конденсате – не более  $20 \text{ мкг/дм}^3$ . В данном режиме используется водный режим аммиака, концентрация рабочего раствора определяется в процессе наладки и находится в пределах 0,5–2 %. Раствор дозируют плунжерными насосами в добавочную или питательную воду. Дозу аммиака регулируют автоматически по импульсу от расхода добавочной воды. Раствор аммиака может дозироваться в питательную воду по индивидуальной или индивидуально-групповой схеме. По индивидуальной схеме раствор аммиака дозируется одним плунжерным насосом на группу однотипных котлов. Отдозированный раствор транспортируется питательной водой через распределительные шайбы во всасывающий трубопровод каждого питательного насоса.

Аммиачную обработку проводят для предупреждения коррозии металла питательного тракта путем повышения  $\text{pH}$  питательной воды.

Коррозионная активность конденсата и питательной воды обусловлена присутствием в них кислорода и угольной кислоты. Поступление этих агрессивных газов в КПТ возможно из-за присосов воздуха через неплотности вакуумной системы конденсаторов турбин, подогревателей и наливных насосов, угольная кислота  $\text{H}_2\text{CO}_3$  может поступить с конденсатом турбин при неполном поглощении её анионитом на блочно-обессоливающих установках (БОУ).

Угольная кислота накапливается в контуре блоков при неудовлетворительной работе отсосов неконденсирующихся газов в регенеративных подогревателях, бойлерах, а также при недостаточном выпаре в деаэраторах.

Опыт эксплуатации свидетельствует о том, что деаэрирующая способность как конденсаторов турбин, так и деаэраторов может обеспечить глубокую, соответствующую нормам ПТЭ, деаэрацию конденсата и питательной воды по удалению кислорода в широком диапазоне паровых нагрузок. Повышенное содержание кислорода в конденсате может быть следствием присоса воздуха в вакуумной системе конденсатора или сливных насосов. Особенно неблагоприятным с точки зрения присосов воздуха в деаэрации является режим работы конденсатора при низких паровых нагрузках (ниже 50 %).

Возможности деаэраторов по удалению угольной кислоты весьма ограничены, в связи с чем возникает необходимость в обработке питательной воды аммиаком для нейтрализации угольной кислоты и повышения рН до  $9,1 \pm 0,1$ . При таком рН на поверхности металла котла создается защитная пленка, предохраняющая его от разрушения.

Процесс нейтрализации угольной кислоты аммиаком может быть представлен следующими реакциями:



Раствор аммиака в воде является слабым электролитом, основные свойства его ослабевают по мере повышения температуры. Аммиак обладает высокой летучестью, а в присутствии кислорода способен вызывать аммиачную коррозию трубной системы теплообменных аппаратов, изготовленных из медных сплавов. Перечисленные отрицательные свойства аммиака следует учитывать в процессе эксплуатации.

Концентрация уголекислоты в питательном тракте блоков может достигать  $150 \text{ мкг/дм}^3$ . Для нейтрализации такого количества уголекислоты при стехиометрическом соотношении ( $0,4 \text{ мг NH}_4$  и  $1 \text{ мг CO}_2$ ) потребуется  $0,06 \text{ мг/кг}$  аммиака. Расчетная доза аммиака недостаточна для поддержания

нормального значения рН питательной воды, и практическая доза его значительно превышает расчетную.

Концентрация аммиака, способная создать заданное значение рН, зависит от температуры; при ее изменении в конденсатно-питательном контуре блока температуры конденсата от 25 до 270 °С диссоциация аммиака снижается с  $1,76 \cdot 10^{-5}$  до  $1,12 \cdot 10^{-6}$ . Это обстоятельство обуславливает необходимость увеличения концентрации аммиака для поддержания значения рН с повышением температуры. Так, для обеспечения рН, равной 9,0, в конденсате при температуре 25 °С достаточно иметь  $250 \text{ мкг/дм}^3 \text{ NH}_3$ , а для поддержания того же значения рН в деаэрированной воде при температуре 270 °С потребуется не менее  $1200 \text{ мкг/дм}^3 \text{ NH}_3$ .

Для создания коррозионно-безопасных условий работы трубной системы конденсаторов турбин не следует дозу аммиака иметь выше 500 мкг/кг в точке после деаэрата. С учетом частичного вывода аммиака с отсосом из конденсаторов турбин содержание его в конденсате будет на уровне  $350 \text{ мкг/дм}^3$ . При таком содержании аммиака и нормативном значении кислорода активность среды по отношению к трубной системе конденсаторов будет низка, и заметного растворения латуни не произойдет. В то же время при содержании аммиака  $350 \text{ мкг/дм}^3$  и нормативном содержании кислорода ( $20 \text{ мкг/дм}^3$ ) в трубной системе ПНД, где температура значительно выше 25 °С, наблюдается заметная коррозия латуни. Для создания оптимальных условий работы трубной системы ПНД с точки зрения предотвращения коррозионного разрушения аммиак целесообразно вводить не в конденсатный тракт, а после деаэрата.

Так как аммиак частично выводится из конденсаторов турбин и полностью удаляется на БОУ, для поддержания требуемого значения рН питательной воды необходима постоянная подача его после деаэрата.

#### 2.5.3.4. Гидразинный водно-химический режим

При данном водно-химическом режиме обработку питательной воды ведут только гидразином. Качество питательной воды  $\text{pH} = 7,7 \pm 0,2$ , содержание гидразина  $C_{\text{N}_2\text{H}_4} = 20\text{--}60 \text{ мкг/дм}^3$ , натрия  $C_{\text{Na}^+} = 5 \text{ мкг/дм}^3$ , железа  $C_{\text{Fe}^{3+}} = 10 \text{ мкг/дм}^3$ , удельная электропроводимость  $\chi = 0,2 \text{ мкСм/см}$ , содержание кислорода не более  $10 \text{ мкг/дм}^3$ . Восстановительный режим отличается от гидразинно-аммиачного значением рН питательной воды. Взаимодействие гидразина с кислородом и оксидами железа и меди протекает по приведенным ниже уравнениям (2.8–2.14). Восстановительный

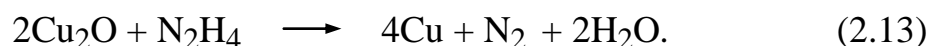
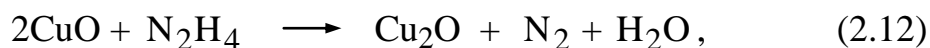
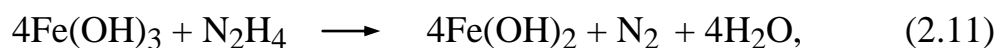
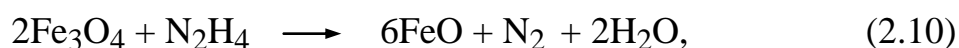
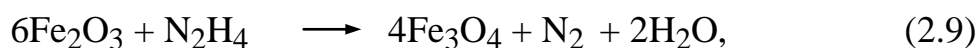
режим применяется для блоков со 100%-ной очисткой конденсата. Трубная система ПНД изготовлена из латуни. При гидразинной обработке раствор гидразина непрерывно дозируется перед ПНД.

Режим может использоваться при полной химической очистке пароводяного контура от загрязнений, в том числе и от меди. В регламенте обоих режимов вводится только гидразин, и обеспечивается защита латуни трубной системы ПНД. В питательном тракте (после деаэратора) при восстановительном режиме рабочая среда с  $pH = 7,72 \pm 0,2$  контактирует со стальными поверхностями ПВД и экономайзера. В экономайзере доза разложившегося гидразина достигает 50 %. Продуктом термического разложения гидразина является аммиак, pH среды здесь не выше 7,7. В турбине возможно дальнейшее её изменение pH. Чтобы применять восстановительный режим, необходимо подробно исследовать условия создания защитной плёнки на стальных поверхностях котла и в проточной части турбины.

Гидразинная обработка питательной воды протекает по схеме:



Определяющими факторами этого процесса являются концентрация растворённого кислорода, избыток гидразина, температура и pH среды. Окисление гидразина ускоряется с повышением температуры и при значениях  $pH = 8,7-11,0$ . Гидразинный режим является и восстановительным, так как гидразин удаляет не только кислород, но и снижает скорость коррозии. В присутствии гидразина происходит восстановление оксидов железа и меди по следующему механизму:





Скорость этих реакций возрастает с повышением температуры струи и зависит от рН. Избыточный гидразин в условиях работы котла разлагается с образованием аммиака и азота:



Этот процесс завершается в котловой воде. Расход гидразина для обработки питательной воды может быть определен как:

$$q_{\text{N}_2\text{H}_4} \leq 3 C_1 + 0,3 C_2 + 0,15 C_3,$$

где  $C_1$  – концентрация кислорода в питательной воде до ввода гидразина, мкг/дм<sup>3</sup>;  $C_2$  – концентрация оксидов железа  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  в питательной воде, мкг/дм<sup>3</sup>;  $C_3$  – концентрация оксидов меди  $\text{CuO}$  в питательной воде, мкг/дм<sup>3</sup>.

Гидразинную обработку питательной воды ведут непрерывно; рабочий раствор вводят после деаэраторов во всасывающий трубопровод питательного насоса. Процесс регулируется автоматически по импульсу от расхода питательной воды. Гидразин поставляется на электростанции в бочках из нержавеющей стали, концентрацией 64 %, в специально оборудованных вагонах или контейнерах. По условиям пожарной безопасности хранят гидразин на ВПУ концентрацией не выше 30 % в герметичных баках из нержавеющей стали. Допускается хранение разбавленного гидразина в емкостях из перлитной стали с химзащитным покрытием или в таре из алюминия.

Разбавляют гидразин до 30 % концентрации конденсатом с применением эжекторной схемы с полным исключением контакта обслуживающего персонала с раствором. Концентрацию рабочего раствора гидразина поддерживают в пределах 1–2 %. Ёмкости и насосы – дозаторы рабочего раствора, размещают в турбинном отделении в специально околтурбинной зоне.

Рабочий раствор гидразина дозируют в питательную воду по индивидуальной или индивидуально-групповой схеме. При индивидуально-групповой схеме отдозированное количество раствора гидразина транспортируется питательной водой и распределяется по питательным насосам через ограничительные шайбы. Диаметр шайб рассчитывают по расходу раствора и уточняют в процессе наладки.

Химический контроль ведут, определяя содержание гидразина в питательной воде перед экономайзером, в соответствии с нормами ПТЭ оно должно быть в пределах 20–60 мкг/дм<sup>3</sup>.

### 2.5.3.5. Водно-химические режимы прямоточных котлов

Процесс в прямоточных котлах характерен значительными изменениями термофизических свойств рабочего тела – температуры и плотности. Эти параметры пара определяют растворимость в нём различных соединений, поэтому надёжность работы блоков сверхкритического давления (СКД) в большей степени зависит от водно-химических режимов. С ростом параметров и единичной мощности энергоблоков усиливается влияние водно-химического режима на надёжность и экономичность работы электростанций.

Вывод загрязнений из пароводяного цикла прямоточных котлов осуществляется конденсатоочисткой. В этих условиях основными примесями питательной воды становятся не соли, а продукты коррозии конструкционных материалов, в основном оксиды железа и меди. Даже при сравнительно малых содержаниях оксидов железа в питательной воде прямоточных котлов СКД (10–12 мгк/дм<sup>3</sup>) происходит постепенное накопление их на поверхностях нагрева, особенно в нижней радиационной части (НРЧ) котла, которая несёт наибольшие тепловые нагрузки (табл. 2.6).

Опыт промышленной эксплуатации показал, что одной из основных причин аварийных остановов блоков, работающих на газомазутном топливе, является повреждённость НРЧ, обусловленная, главным образом, образованием железоксидных отложений на внутренних поверхностях нагрева.

Условия надёжной эксплуатации котлов с точки зрения получения чистого пара должны предусматривать выполнения всех показателей, регламентированных теплехимическими испытаниями. В этом случае, при всех прочих значениях качество пара котлов среднего давления будет находиться в прямой зависимости от солесодержания котловой воды.

Для котлов высокого давления чистота насыщенного пара будет определяться в основном качеством воды, подаваемой на паропромывочное устройство. Такая зависимость обусловлена поведением кремниевой кислоты, её способностью к «избирательному» уносу паром. Следовательно, для получения чистого пара высокого давления недостаточно обеспечивать заданные пределы по составу котловой воды, необходимо иметь низкое солесодержание и содержание кремниевой кислоты и других составляющих питательной воды, контактирующей с паром НРЧ паропромывочном устройстве.

В связи с этим, подготовку добавочной воды для котлов высокого давления ведут методом термического или химического обессоливания.

Таблица 2.6

## Нормы качества воды и пара для прямоточных котлов

№ №		Нормируемые показатели (не более)																	
		Ж <sub>о</sub>	Щ <sub>г</sub>	SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Fe <sup>3+</sup>	NH <sub>3</sub>	N <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Cu <sup>2+</sup>	O <sub>2</sub>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	Окисл.	УЭП	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	Нефте- пр.	CO <sub>2</sub>	Взв. вещ.	рН	
		мкг-экв/дм <sup>3</sup>		мкг/дм <sup>3</sup>						мкг/дм <sup>3</sup>	мкг/дм <sup>3</sup>	мгО <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	мкСм/см	мг/дм <sup>3</sup>	мг/дм <sup>3</sup>	мг/дм <sup>3</sup>	мг/дм <sup>3</sup>	ед.	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	
1	Питательная вода	0,2		15	10	1000	20-60	5,0	10	20	50		0,3		0,3				9,0+0,1
2	Котловая вода ч/о		Щ <sub>фф</sub> = (0,2-0,5) Щ <sub>общ</sub>	2500										0,5-2					9,0-9,5
3	Котловая вода с/о		Щ <sub>фф</sub> = (0,2-0,5) Щ <sub>общ</sub>	25000										12					0,5
4	Насыщенный пар			25							5		0,3						>7,5
5	Перегретый пар перед турбиной			25							5		0,3						>7,5
6	Обессоленная вода	0,2		100	10			5,0			50		1,0						
7	Очищенный конденсат	0,2			10			5,0							0,3				
8	Конденсат ТГ	0,2		60	10			5,0	20										
9	Конденсат подогр. и бойлеров	0,2		60	10			5,0									отс.		
10	Деаэраторы НД								30										
11	Деаэраторы ВД								10										
12	БНТ	0,2		60	10										0,3				

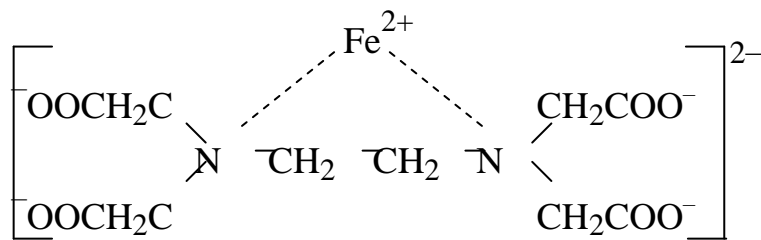
Окончание табл. 2.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
13	Конденсат дренажного бака	0,2		60	10										0,3			
14	БЭК	0,2		100	10													
15	Конденсат с КТЦ	10		100														
16	Конденсат с мазут. хоз-ва	10		100	30	100		20				1,5			10			8,5–9,2
17	Подпиточная вода для теплосети								50						1,0	отс.	5	8,3–9,5
18	Дистиллят охлаждения статора генератора							100	400				1,0					8,5+0,5
19	Сетевая вода				500				20						1,0	отс.	5	8,3–9,5
20	Конденсат испарителей	0,2		60	20						10					2,0		
21	Питательная вода испарителей	2							30							отс.		

### 2.5.3.6. Комплексонный водно-химический режим

Обработку питательной воды при этом режиме ведут гидразином, аммиаком и комплексонами. В основе комплексонного водно-химического режима лежит свойство комплексонов образовывать с оксидами железа и меди питательной и котловой воды комплексные соединения с последующим разложением комплексонатов металлов в котле.

В качестве комплексообразователя применяют аммонийную соль этилендиаминтетрауксусной кислоты (ЭДТА). ЭДТА и её соли относятся к мультидентантным хелатообразующим соединениям, включающим кислотные и основные центры. ЭДТА содержит две аминоктоацетатные группы, соединенные между собой этиленовым мостиком, что обеспечивает образование с металлами большого числа циклов, в том числе наиболее устойчивого пятичленного, включающего оба атома азота и металла:



Комплексы, образуемые ЭДТА с катионами, отличаются высокой прочностью. Константы нестойкости и для комплексонов двухвалентных металлов – железа, меди и кальция,  $\text{FeJ}^{2-}$ ,  $\text{CuJ}^{2-}$ ,  $\text{CaJ}^{2-}$  достигают наибольших значений в интервале  $\text{pH} = 8\text{--}10$  и составляют 12,5, 14 и 10.

В связи с высокой устойчивостью образующихся комплексов и малой степени их диссоциации практически не может быть достигнуто произведение растворимости для большинства присутствующих в питательной воде труднорастворимых соединений. Реакции комплексообразования между ЭДТА и катионами протекают количественно. При температуре выше  $200\text{ }^\circ\text{C}$  комплексоны и комплексонаты подвергаются термическому разложению с образованием продуктов распада в виде твердой, газообразной и жидкой фаз. При разложении комплексонатов железа на поверхности металла образуется магнетит. Продуктом термолиза, содержащимся в жидкой фазе, является формальдегид, в газообразной – водород, оксид углерода и метан. Эффективность комплексонной обработки обеспечивается при следующих условиях: дозировании в конденсатный тракт гидразингидрата для предупреждения кислородной нагрузки металла и пассивации трубной системы ПНД; дозировании

в питательный тракт за деаэратором для образования комплексонатов железа, меди и цинка в питательной воде. Регулирование дозы гидразина, аммиака, комплексона должно быть по импульсу от расхода питательной воды. Расчёт дозы комплексона:

$$q_{\text{ЭДТА}} = 5,2 \cdot C_{\text{Fe}^{2+}} + 4,6 \cdot C_{\text{Cu}^{2+}} + 4,6 \cdot C_{\text{Zn}^{2+}},$$

где  $C_{\text{Fe}^{2+}}$ ,  $C_{\text{Cu}^{2+}}$ ,  $C_{\text{Zn}^{2+}}$  – содержание железа, меди и цинка в точке ввода комплексона, мкг/дм<sup>3</sup>.

ЭДТА является комплексообразующим агентом, взаимодействующим не только с катионами питательной воды, но и с катионами отложений, образовавшихся на внутренней поверхности металла питательного тракта. При этом может происходить вымывание отложений из питательного тракта и перенос их в котел с увеличением темпа роста отложений на поверхностях нагрева. Поэтому перед комплексонной обработкой проводят химическую очистку котлов и питательного тракта. Аммонийная соль ЭДТА в концентрациях, выше расчетной стехиометрической дозы может вызвать коррозию металла питательного тракта, поэтому необходимо правильно рассчитать дозу комплексона и правильно организовать его дозирование.

#### 2.5.3.7. Окислительный водно-химический режим

Обработка питательной воды предусматривает ввод кислорода в газообразной форме или разбавленного раствора перекиси водорода в нейтральную или слабощелочную воду. При этом на поверхности металла образуется защитный (пассивирующий) слой, состоящий из оксидов железа.

Защитный слой из оксидов железа образуется на всей поверхности металла котла. Для более эффективного образования защитного слоя должны выполняться следующие условия: достаточная концентрация растворённого кислорода в питательной воде; температура среды; отсутствие конкурентных анодных реакций на поверхности металла (анодное окисление  $\text{Cl}^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ , которые образуют соли, повышая растворимость трёхвалентного железа).

Защитные свойства оксидных пленок определяются их структурой (пористостью), толщиной и адгезией к металлу. Пассивное состояние металла обеспечивают плотные, сплошные, тонкие оксидные плёнки. По составу оксидные плёнки могут состоять из различных модификаций

гематита  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и вюстита  $\text{FeO}$ . Соотношение указанных компонентов зависит от температуры среды и характера водно-химического режима.

Можно говорить только об общих закономерностях реакций окисления в системе железо–вода при различной температуре. При температуре ниже  $250\text{ }^\circ\text{C}$  реакции в системе железо–вода протекают по электрохимическому механизму. В интервале температур  $400\text{--}575\text{ }^\circ\text{C}$  железо контактирует не с водой, а с водяным паром, поведение которого описывается законами газообразной среды. Окисление железа описывается параболической зависимостью Таммана:

$$d^2 = K \cdot \tau,$$

где  $d$  – толщина защитного пассивного слоя,  $K$  – таммановская постоянная для оксидов железа (зависит от температуры),  $\tau$  – время.

В нейтральной среде и в присутствии кислорода в интервале температур  $400\text{--}575\text{ }^\circ\text{C}$  внешний слой может окисляться до гематита. Весь оксидный слой растёт по обе стороны поверхности металла. Структура слоёв различна. Окисление протекает через промежуточные реакции, самая медленная из которых определяет скорость всего процесса окисления.

Кислород, который расходуется при реакции, берётся из пара вследствие термоллиза воды. Сложность механизма воздействия кислорода на сталь оказывает влияние и на выбор оптимальных условий по расходу кислорода для образования закисной плёнки на отдельных участках пароводяного тракта блоков СКД. Медь и медные сплавы ведут себя в условиях окислительного ВХР по-другому. Если ионы меди попадают в пароводяной тракт, то оксид меди вместе с паром поступает в турбину и в процессе расширения пара осаждается преимущественно в форме оксида одновалентной меди.

В литературе известны случаи, когда внедрение окислительного режима проводится на блоках, ранее работавших в гидразинно-аммиачном или щелочном режимах с минимальным содержанием кислорода в питательной воде. Поэтому в составе отложений на поверхностях ПВД и экранной системы содержится медь. Кислород активно окисляет медь с выносом продуктов окисления в проточную часть турбины. Поэтому до перевода блоков на окислительный режим необходима замена латунной трубной системы ПВД на нержавеющую, и должна быть проведена химическая очистка конденсатно-питательного тракта и испарительных поверхностей котла от отложений меди.

Кислород вводится во всасывающий коллектор конденсатных насосов и после деаэрата (рис. 2.6). Кислород дозируется в питательную воду через водоструйный эжектор. Дозирование кислорода ведётся через узел регулирования, включающий регулирующий клапан, ротаметр, манометр и обратный затвор.

Подача кислорода регулируется по показателям автоматического кислородомера МАРК-4, установленного на питательной воде перед котлом. Рассчитать оптимальную концентрацию окислителя для ВХР с достаточной точностью сложно. Оптимальная концентрация окислителя должна соответствовать конкретным требованиям:

- 1) создание плотной защитной плёнки на поверхности стали;
- 2) отсутствие коррозионного разрушения аустенитных сталей 3;
- 3) низкое содержание железа в теплоносителе всех поверхностей нагрева.

Механизм окислительного водно-химического режима сводится к образованию пассивирующей плёнки по следующим реакциям:

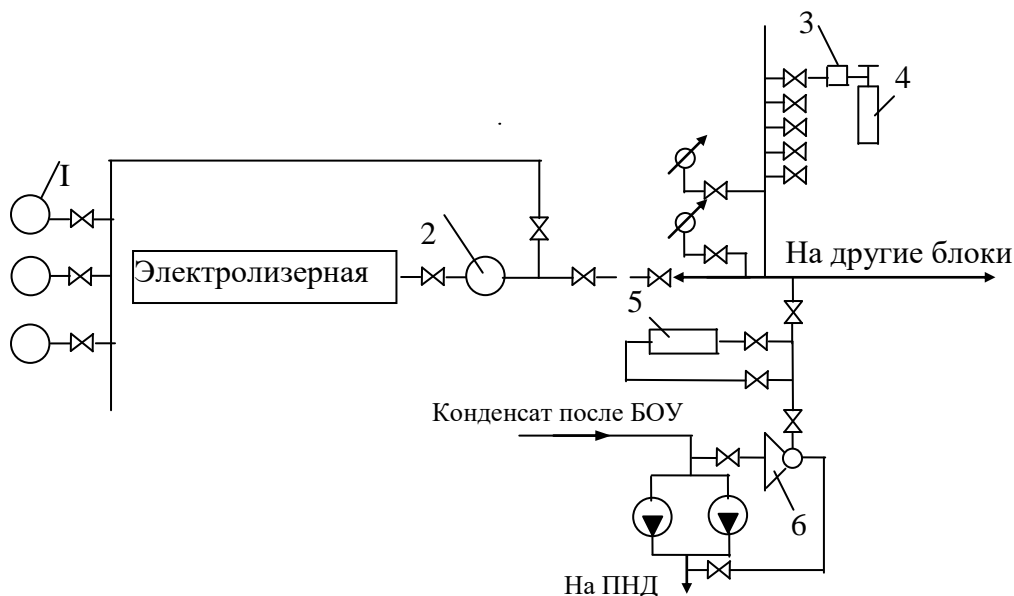
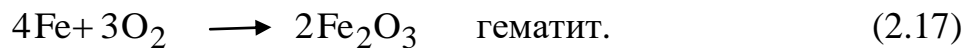


Рис. 2.6. Схема ввода кислорода в контур блока 500 МВт:  
 1 – кислородный ресивер; 2 – вымораживатель; 3 – редуктор; 4 – баллон с кислородом;  
 5 – ротаметр; 6 – эжектор



Эти требования могут быть обеспечены при умеренной концентрации кислорода, не более  $200 \text{ мкг/дм}^3$ . При более высокой концентрации окислителя и высокой температуре (более  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ ) возможно доокисление магнетита до гематита. Сцепление плёнки гематита с металлом в сравнении с магнетитом менее прочное, поэтому увеличивается возможность отслаивания плёнки при работе блока на переменных нагрузках. Анализ содержания железа подтверждает это явление. Для аустенитных сталей высокие концентрации ок-лителя ускоряют коррозионные разрушения. Для блоков СКД 300 и 500 МВт оптимальное содержание кислорода в питательной воде –  $120 \text{ мкг/дм}^3$ , содержание железа –  $4\text{--}6 \text{ мкг/дм}^3$ . Расход кислорода на создание защитной плёнки – не более  $40\text{--}50 \text{ мкг/дм}^3$ . Снижение концентрации кислорода в питательной воде до  $80 \text{ мкг/дм}^3$  приводит к увеличению содержания железа до  $10\text{--}12 \text{ мкг/дм}^3$  [5].

Сравнительная характеристика коррекционных водно-химических режимов котловой воды приведена в табл. 2.7.

## Контрольные вопросы к главе 2

1. Перечислите основные задачи ВХР ТЭО.
2. Назовите, какие ВХР применяются для барабанных котлов.
3. Назовите, какие коррекционные ВХР применяются для прямоточных котлов.
4. Объясните, что вводится в котловую воду при фосфатировании.
5. Объясните, что вводится в котловую воду при гидразинно-аммиачном ВХР.
6. Дайте сравнительную характеристику восстановительного и окислительного ВХР режимов.

Таблица 2.7

## Сравнительная характеристика коррекционных водно-химических режимов котловой воды

ВХР	Тип котла	Ввод реагента	Механизм	Доза реагента	pH
1	2	3	4	5	6
1. Фосфатирование	Барабанный	$\text{Na}_3\text{PO}_4$ (непосредственно в котел)	$10\text{Ca}^{2+} + 6\text{PO}_4^{3-} + 2\text{OH}^- \rightarrow$ $\rightarrow 3\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2$ Ступенчатый гидролиз: 1. $\text{Na}_3\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{HPO}_4 + \text{NaOH}$ . 2. $\text{Na}_2\text{HPO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaH}_2\text{PO}_4 + \text{NaOH}$ . 3. $\text{NaH}_2\text{PO}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_3\text{PO}_4 + \text{NaOH}$ . Состав накипи: $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2, \text{CaSiO}_3, \text{MgSiO}_3, \text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2,$ $\text{CaSO}_4, \text{MgSO}_4$ .	$40 \cdot \text{Щ}_{\text{общ}} \leq 0,84 \cdot C_{\text{PO}_4^{3-}}$ , мг-экв/дм <sup>3</sup>	9,1–10,4
2. Гидразинно-аммиачный	Барабанный, прямоточный всех давлений	$\text{NH}_3 + \text{N}_2\text{H}_4$ (после деаэрата)	$\text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NH}_4\text{OH}$ , $\text{NH}_4\text{OH} + \text{H}_2\text{CO}_3 \rightarrow \text{NH}_4\text{HCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$ , $\text{NH}_4\text{HCO}_3 + \text{NH}_4\text{OH} \rightarrow (\text{NH}_4)_2\text{CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	Концентрация вводимого аммиака 0,5–2,5 % раствора	$9,1 \pm 0,1$
3. Гидразинный	Барабанный, прямоточный	$\text{N}_2\text{H}_4$ (после деаэрата перед ПНД)	$\text{N}_2\text{H}_4 + \text{O}_2 \rightleftharpoons \text{N}_2 \uparrow + 2\text{H}_2\text{O}$ , $6\text{Fe} + \text{N}_2\text{H}_4 \rightleftharpoons 2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{N}_2 + 2\text{H}_2\text{O}$ , $2\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{N}_2\text{H}_4 \rightarrow 4\text{FeO} + \text{N}_2 \uparrow + 2\text{H}_2\text{O}$ , $4\text{Fe}(\text{OH})_3 + \text{N}_2\text{H}_4 \rightarrow 4\text{Fe}(\text{OH})_2 + \text{N}_2 + 4\text{H}_2\text{O}$ , $2\text{Cu}_2\text{O} + \text{N}_2\text{H}_4 \rightarrow 4\text{Cu} + \text{N}_2 \uparrow + 4\text{H}_2\text{O}$ , $\text{CuO} + \text{N}_2\text{H}_4 \rightarrow \text{Cu}_2\text{O} + \text{N}_2 \uparrow + 2\text{H}_2\text{O}$ . Реакция восстановления продуктов коррозии на поверхности котла	20–60 мкг/дм <sup>3</sup>	$7,7 \pm 0,2$

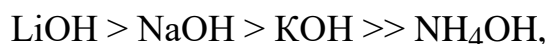
Окончание табл. 2.7

1	2	3	4	5	6
4. Комплексонный	Прямоточный	ЭДТА, её натриевые и аммонийные соли, комплексообразователи (хиламин)	<p>Реакция комплексообразования приводит к образованию растворимого комплекса</p> $\left[ \begin{array}{c} \text{OOCH}_2\text{C} \backslash \\ \text{Fe}^{2+} \\ \text{CH}_2\text{COO} / \\ \text{N-CH}_2\text{-CH}_2\text{-N} \\ \text{OOCH}_2\text{C} / \quad \backslash \\ \text{CH}_2\text{COO} \end{array} \right]^{2-}$	$q_{\text{ЭДТА}} = 5,2C_{\text{Fe}^{2+}} + 46C_{\text{Cu}^{2+}} + 6C_{\text{Zn}^{2+}},$ мкг/дм <sup>3</sup>	8–10
5. Окислительный	Прямоточный	Газообразный O <sub>2</sub> , раствор H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	<p>Продукт образования пассивирующей плёнки на поверхности металла</p> $6\text{Fe} + 4\text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{Fe}_3\text{O}_4,$ $2\text{Fe} + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{FeO},$ $4\text{Fe} + 3\text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{Fe}_2\text{O}_3.$	$\alpha^2 = K\tau,$ <p>где <math>\alpha</math> – толщина образующей плёнки, <math>K</math> – константа Таммана (зависит от температурного режима), <math>\tau</math> – время образования плёнки.</p>	6–7,3

### ГЛАВА 3. ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ АТОМНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ (АЭС)

#### 3.1. Водно-химический режим первого контура АЭС с реактором ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор)

Особенностью водно-химического режима первого контура АЭС с реактором ВВЭР является регулирование реактивности реактора добавлением в циркуляционную воду раствора борной кислоты до концентрации  $13 \text{ г/дм}^3$ . Борная кислота обладает рядом преимуществ: она растворима в воде, и ее растворимость растет с повышением температуры; практически не реагирует с материалами первого контура; не создает отложений на внутренней поверхности реактора. Вместе с тем борная кислота снижает рН воды первого контура. Для увеличения рН воды в контур дозируется щелочь. При выборе щелочи исходят из следующих соображений: по своей агрессивности к циркониевым сплавам щелочи располагаются в следующий ряд:



поэтому аммиачный водный режим наиболее безопасен в отношении оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ) из сплавов циркония [27].

Однако аммиак при высокой температуре (около  $300 \text{ }^\circ\text{C}$ ) мало диссоциирован, поэтому его свойства как щелочи ослабевают. Для поддержания необходимого рН требуется высокая концентрация аммиака (до  $100 \text{ мг/дм}^3$ ), что приводит к увеличению содержания водорода за счет радиолитического и к возможному водородному охрупчиванию стали.

Применение NaOH недопустимо в связи с сильным увеличением активности воды за счет появления радионуклида Na-24 с периодом полураспада 15 ч и энергией  $\gamma$ -квантов 2,75 МэВ.

При использовании LiOH образуется радиоактивный тритий по реакции:



Тритий входит в состав воды ( $\text{T}_2\text{O}$ ) и поэтому не может быть удален из первого контура реактора. Тем самым создается радиационная опасность для персонала АЭС при разгерметизации контура, например, при перегрузках ТВЭЛов.

Выбор был остановлен на КОН; хотя калий также активируется с образованием радиоактивного атома по реакции  $^{41}\text{K} (n, \gamma) ^{42}\text{K}$ , однако активность радионуклида К-42 невелика.

На зарубежных АЭС используется LiOH без нуклида  $^6\text{Li}$ . Преимуществом LiOH является большая химическая активность, поэтому его содержание в воде контура может быть снижено по сравнению с КОН в несколько раз. В то же время LiOH накапливается в контуре при облучении бора нейтронами:

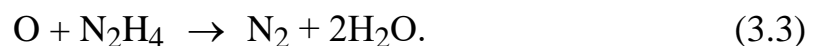


За одну кампанию в первом контуре ВВЭР-440 накапливается до 800 г лития, таким образом, фактически нейтрализация борной кислоты производится смесью LiOH и КОН.

При регулировании рН воды едкими щелочами необходимо учитывать, что высокие концентрации щелочи могут привести к коррозии циркониевых сплавов. Поэтому для стабилизации концентрации КОН на небольшом постоянном уровне в воду добавляется аммиак.

Аммиачно-калиевый водный режим позволяет очень удобно нейтрализовать борную кислоту. При работе реактора и высокой температуре воды, когда степень диссоциации борной кислоты незначительна, мала диссоциация и  $\text{NH}_4\text{OH}$ , и его основные свойства выражены слабо. Нейтрализация борной кислоты в этих условиях в основном производится КОН. При низкой температуре во время остановки реактора основные свойства аммиака позволяют поддерживать необходимое значение рН без дополнительного увеличения концентрации КОН.

Для связывания свободного кислорода в воду первого контура вводится гидразин, который взаимодействует с кислородом по реакции:



Введение гидразина в воду особенно целесообразно при ремонтных работах на открытых реакторах, когда кислород попадает в воду в больших количествах.

Основными загрязнениями воды первого контура являются продукты коррозии конструкционных материалов, в первую очередь,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и хлориды. Последние попадают в контур вместе с подпиточной водой и корректирующими добавками: борной кислотой, щелочью, аммиаком, гидразином.

Таким образом, нормальный водно-химический режим первого контура ВВЭР может быть обеспечен при выполнении следующих условий:

- а) поддержание рН воды в заданных пределах;
- б) ограничение содержания хлоридов и фторидов;
- в) эффективное удаление продуктов коррозии и других примесей из воды.

Очистка проводится на ионитных фильтрах без снижения давления или со снижением его до 2 МПа, что практически исключает выделение из воды растворенного водорода. Катионит в фильтрах работает в смешанной аммонийно-калиевой (К–NH<sub>4</sub>)–форме. Оптимальное соотношение ионов K<sup>+</sup> и NH<sub>4</sub><sup>+</sup> в катионите и воде создается в процессе работы фильтра. В начале катионит переводится в NH<sub>4</sub>–форму за счет поглощения избытка аммиака из воды. Затем после выхода на мощность в воду дозируется КОН. Между фильтром и водой устанавливается равновесие по содержанию калия. По достижении определенной концентрации КОН в воде подача его прекращается, и в дальнейшем дозируется только аммиак. Для увеличения концентрации КОН его вытесняют из катионита добавлением в воду аммиака. Для снижения содержания КОН подключается резервный фильтр в Н–форме, при этом часть ионов K<sup>+</sup> и NH<sub>4</sub><sup>+</sup> сорбируется катионитом.

В начале кампании большое содержание бора в контуре создается подпиткой реактора раствором борной кислоты высокой концентрации. Снижение содержания борной кислоты в течение кампании осуществляется подпиткой контура чистой водой, при этом борная кислота медленно выводится из контура с организованными протечками и специально сливаемой из контура водой, так называемым сливом первого контура.

В конце кампании для быстрого увеличения реактивности реактора подключается резервная цепочка фильтров на установке очистки организованных протечек и слива контура, при этом борная кислота выводится посредством поглощения очищенным от борной кислоты анионитом в ОН–форме.

Нормы качества воды (табл. 3.1) [27] устанавливают максимально допустимое содержание продуктов коррозии, кислорода, хлоридов и некоторых других веществ, а также оптимальное значение рН и необходимую концентрацию калия, лития, натрия, аммиака и водорода.

Качество воды первого контура

Нормируемый показатель	Значение		
	Россия	США	Германия
pH	9,7–10	6,4–6,7	4,0–10,5
		при 300 °С	
Содержание K+Li+Na, мг/дм <sup>3</sup>	0,02–0,3	0,2–2,0	–
Содержание NH <sub>4</sub> OH, мг/дм <sup>3</sup>	>5	–	≤ 20
Содержание H <sub>2</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	30–60	>30	≤ 3
Содержание O <sub>2</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>	<10	<100	<100
Содержание Cl, мкг/дм <sup>3</sup>	<100	<150	<200
Содержание Fe, мкг/дм <sup>3</sup>	<200	–	<500
Содержание N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>	–	–	≤ 20
Содержание SiO <sub>2</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>	–	–	<1
Содержание H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> , г/дм <sup>3</sup>	<13	<9	<14
Активность, Бк/дм <sup>3</sup>	<2,0	–	–

### 3.2. Водно-химический режим второго контура АЭС с реактором ВВЭР

Материалом для второго контура АЭС с реактором ВВЭР являются углеродистая сталь и латунь (трубные пучки подогревателей низкого давления (ПНД) и конденсаторов турбин). Только трубные пучки парогенераторов, в равной степени принадлежащих как первому, так и второму контурам, выполняются из нержавеющей стали.

Основными загрязнениями питательной воды являются соли жесткости, кремниевая кислота и хлориды, поступающие с подпиточной водой и присосами охлаждающей воды в конденсаторе турбин, а также кислород, поступающий за счет присосов воздуха в вакуумную систему турбин, и продукты коррозии.

Хлориды и кремниевая кислота нормируются, и принимаются меры к снижению их содержания не только в питательной, но и в продувочной воде парогенераторов во избежание хлоридного растрескивания трубных пучков и заноса проточной части турбин, вызванных отложением продуктов коррозии и окиси кремния, причем последняя играет «цементирующую» роль, образуя прочную стекловидную массу.

На АЭС первого поколения с реакторами ВВЭР очистка турбинного конденсата не предусматривалась. Примеси, поступающие за счет

присосов охлаждающей воды, и продукты коррозии выводились из парогенераторов с продувочной водой.

Для того, чтобы снизить расход продувочной воды до 0,5 % расхода питательной воды, необходима очистка конденсата, в противном случае будет происходить отложение солей жесткости на трубных пучках парогенераторов. Расход продувочной воды будет тем меньше, чем глубже очистка конденсата.

На вторых контурах АЭС с ВВЭР в нашей стране и за рубежом принят в основном аммиачно-гидразинный водный режим. Нейтральный водный режим из-за отсутствия конденсатоочистки и невозможности обеспечения высокой чистоты питательной воды является нерациональным, так как наблюдаются значительный вынос продуктов коррозии и загрязнение питательной воды окислами железа и меди.

Продувочная вода парогенераторов очищается на ионитных фильтрах. Вода забирается с нижней образующей корпуса парогенератора с целью удаления осевших там продуктов коррозии.

Аммиачно-гидразинный и нейтральный водный режим не предотвращают полностью образования отложений на поверхности теплообмена парогенераторов. При 100 %-ной очистке конденсата из него удаляются в основном примеси, поступающие с присосами охлаждающей воды. Основная же часть продуктов коррозии образуется после конденсатоочистки, что вызывает поступление их в парогенераторы и образование железистоокисных и медистых отложений на трубном пучке.

Образование отложений вызывает необходимость периодических химических промывок парогенераторов, поэтому существующие водные режимы нельзя считать оптимальными по своим эксплуатационным показателям.

Способ обработки питательной воды парогенераторов комплексо-нами обеспечивает перевод катионов железа, меди, цинка, кальция и магния в хорошо растворимые комплексы и позволяет удалить их из парогенераторов с продувочной водой без образования отложений на поверхности нагрева.

На АЭС для комплексонной обработки питательной воды используются ЭДТК и ее соли, в частности трилон Б. Во избежание повышения содержания хлоридов в продувочной воде парогенераторов необходимо применять реагенты, содержащие не более 1 % хлор-иона (по массе).



Термическое разложение комплексонов и комплексонатов в парогенераторах АЭС с ВВЭР не снижает эффективности комплексонной обработки.

Комплексонный водный режим может проводиться как при непрерывной дозировке реагентов для предотвращения образования отложений, так и при периодической дозировке для удаления «на ходу» ранее образовавшихся отложений.

Концентрация комплексонов в питательной воде ( $\text{мкг/дм}^3$ ) при непрерывной дозировке реагентов определяется по следующему соотношению [28]:

$$C_{\text{ж}} = 186C_{\text{ж}} + 6,7C_{\text{Fe}} + 6,0C_{\text{Cu}} + 6,0C_{\text{Zn}}, \quad (3.4)$$

где  $C_{\text{ж}}$  – жесткость питательной воды;  $C_{\text{Fe}}$ ,  $C_{\text{Cu}}$ ,  $C_{\text{Zn}}$  – соответственно концентрация железа, меди и цинка в питательной воде,  $\text{мкг/л}$ .

В продувочной воде при  $\text{pH} = 10,2 - 10,5$  комплексонат железа разлагается с образованием осадка гидроокиси железа. Поэтому при достижении  $\text{pH} = 10,2$  дозировка комплексона должна быть прекращена до устранения причин, вызвавших возрастание  $\text{pH}$  (например, из-за повышения присосов).

Величина продувки парогенераторов при комплексонном водном режиме остается на прежнем уровне. Присутствие комплексонов и комплексонатов в продувочной воде не препятствует эффективной очистке воды на ионообменных фильтрах. Некоторое снижение фильтроцикла связано с повышением концентрации примесей в продувочной воде. Обменная емкость ионитов остается на обычном уровне.

При комплексонном водном режиме комплексонаты металлов поступают на установку очистки продувочной воды парогенераторов в виде отрицательно заряженных ионов и сорбируются анионитом. Поэтому первым, как правило, истощается анионитный фильтр.

Регенерация анионита проводится щелочью. Возможна также регенерация в два этапа: вначале кислотой, затем щелочью. Второй вариант предпочтительнее, так как позволяет более полно провести регенерацию анионита, но связан с повышенным расходом реагентов.

Нормы качества питательной и продувочной воды парогенераторов АЭС с ВВЭР, принятые в нашей стране и за рубежом, приведены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

**Нормы качества питательной и продувочной воды  
парогенераторов АЭС с реакторами ВВЭР**

Нормируемый показатель	Значение					
	Россия		США		Германия	
	Пит. вода	Прод. вода	Пит. вода	Прод. вода	Пит. вода	Прод. вода
рН	9,0–9,2	–	8,8–9,2	8,5–10,6	<9	–
Жесткость, мг-экв/ дм <sup>3</sup>	<0,5	–	–	–	–	–
Содержание O <sub>2</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>	<10	–	<5	<50	<20	–
Содержание Cl, мкг/дм <sup>3</sup>	–	<1	–	<75	–	<1,0
Содержание Fe, мкг/дм <sup>3</sup>	<20	–	<10	–	<20	–
Содержание Cu, мкг/дм <sup>3</sup>	<10	–	<10	–	<3	–
Содержание N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>	20–60	–	10–20	–	–	–
Содержание SiO <sub>2</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>	<25	<5000	–	<5000	–	<4000
Содержание PO <sub>4</sub> , мг/дм <sup>3</sup>	–	–	–	10–80	–	2–6
Активность, Бк/дм <sup>3</sup>	–	<100	–	–	–	–

На АЭС с ВВЭР второго поколения проектируется очистка всего потока конденсата турбин на ионообменных фильтрах.

### 3.3. Водно-химический режим одноконтурных АЭС

Водно-химический режим одноконтурных АЭС с реакторами кипящего типа отличается тем, что в питательную воду реакторов не вводятся химические реагенты, корректирующие рН (аммиак, щелочь), и борная кислота для регулирования реактивности реактора. Радиолит воды в кипящих реакторах не подавляется. Водный режим поддерживается нейтральным, рН воды, измеренный при 25 °С, должен быть около 7.

С паром уносится не только радиолитические газы, но и некоторые радионуклиды (криптон, ксенон, йод и др.) и часть активных продуктов коррозии конструкционных материалов, поэтому оборудование машинного зала работает в условиях радиоактивного излучения.

Особенностью водного режима одноконтурных АЭС является наличие в циркуляционной воде, остром паре и конденсате греющего пара теплообменников системы регенерации питательной воды большого количества радиолитического кислорода и небольшого количества перекиси водорода, т.е. среда имеет окислительный характер. Это условие накладывает требования на выбор конструкционных материалов.

Основное оборудование, т.е. контур многократной принудительной циркуляции (МПЦ), теплообменники системы регенерации, фильтры очистки конденсата, продувочной воды и пр., изготавливается из нержавеющей стали. Из углеродистой и низколегированной стали изготавливаются паропроводы, проточная часть турбины. Материалом активной зоны реактора являются сплавы циркония. Латунь из-за локальных отложений меди в активной зоне в качестве материала основного контура не используется, за исключением трубок конденсаторов, выполненных из медно-никелевого сплава.

Правильная организация водного режима одноконтурных АЭС обязательно включает в себя очистку всего потока конденсата и продувочной воды контура циркуляции. Конденсат греющего пара теплообменников системы регенерации каскадно сливается в конденсаторы турбин для очистки от продуктов коррозии совместно с основным конденсатом.

Источниками загрязнений питательной воды одноконтурных АЭС являются присосы охлаждающей в конденсаторах турбин и сетевых подогревателей теплофикационных установок и подпиточная вода. Наиболее опасными загрязнениями в отношении коррозии оборудования следует считать хлориды, натрий и уголекислоту.

Для снижения коррозии углеродистой стали и, следовательно, загрязнения питательной воды железом при нейтральном водном режиме должна быть обеспечена высокая чистота питательной воды; электропроводность конденсата на выходе из фильтров конденсатоочистки должна быть не более 0,1 мкСм/см. Кислород из питательной воды удаляется в конденсаторах турбин и деаэраторах. Оставшийся кислород и перекись водорода при высокой чистоте воды снижают скорость коррозии, образуя на поверхности углеродистой стали защитную окисную пленку.

Большое поступление продуктов коррозии в питательную воду наблюдается в первые сутки после пуска блока. Для снижения загрязнения питательной воды окислами железа перед пуском проводится отмывка конденсатно-питательного тракта водой с очисткой ее на фильтрах конденсатоочистки.

Большое внимание на одноконтурных АЭС уделяется плотности конденсаторов турбин, в особенности если охлаждение осуществляется высокоминерализованной, например, морской, водой. Турбины оборудуются несколькими конденсаторами (на турбине 500 МВт – 4 шт.); при появлении присосов в одном из конденсаторов его отключают по охлаждающей воде и герметизируют. Блок при этом не останавливают, а только частично разгружают.

Загрязнения из циркуляционной воды удаляют на установке байпасной очистки продувочной воды контура циркуляции.

Преимущественно задерживаются растворимые примеси, продукты коррозии удаляются в меньшей степени, в основном в период пуска, когда за счет изменения теплогидравлических режимов смывается шлам с контура.

Нормы качества питательной и циркуляционной воды одноконтурной АЭС с реакторами кипящего типа, принятые в нашей стране и за рубежом, приведены в табл. 3.3.

### 3.4. Водно-химический режим АЭС с реакторами на быстрых нейтронах

Водно-химический режим АЭС с реакторами на быстрых нейтронах рассмотрен на примере второго контура блока БН-600 Белоярской АЭС. Второй контур блока состоит из трех автономных петель [29]. Второй контур блока состоит из трех автономных петель. В состав каждой входит прямоточный парогенератор, турбина, работающая на перегретом паре высокого давления с промежуточным перегревом, регенеративные подогреватели низкого и высокого давления, деаэратор.

В составе каждого парогенератора находится испаритель, основной и промежуточный пароперегреватели (рис. 3.1). Греющей средой является металлический натрий при температуре в пределах от 320 до 520 °С.

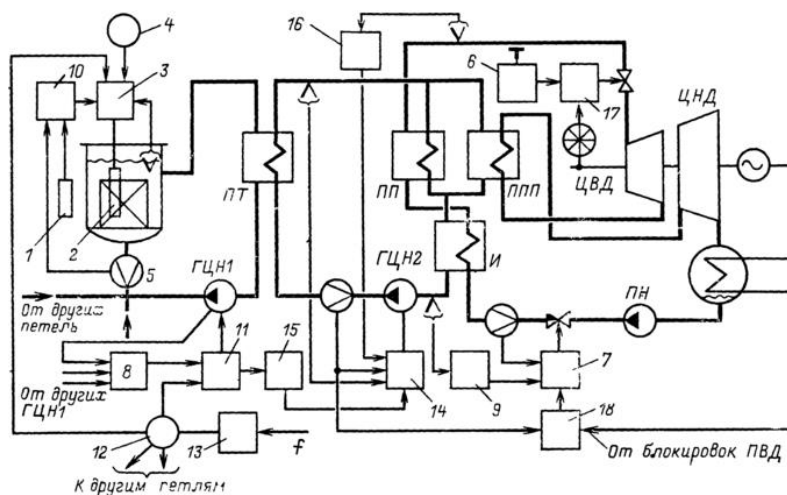


Рис. 3.1. Схема регулирования энергоблока с реактором БН-600:

ПП – пароперегреватель; ППП1 – парогенератор; И – испаритель;  
 ПН – питательный насос; Я – испаритель; ЦВД – цилиндр высокого давления турбины;  
 ЦНД – цилиндр низкого давления турбины; ГЦН1 – главный циркуляционный насос 1,  
 ГЦН2 – главный циркуляционный насос 2, ПТ – теплообменник; 1 – ионизационная  
 камера; 2 – перемещающийся регулирующий стержень; 3 – регулятор; 4 – задатчик;  
 5 – расходомер; 6 – регулятор; 7 – регулятор расхода; 8 – система вычисления расхода  
 СВР; 9 – корректирующий регулятор температуры; 10 – дифференциатор;  
 11 – регулятор; 12 – задатчик мощности блока; 13 – главный регулятор мощности;  
 14 – регулятор; 15 – регулятор; 16 – корректирующий регулятор температуры свежего  
 пара; 17 – РЧВ турбины; 18 – делитель

Таблица 3.3

## Нормы качества питательной и циркуляционной воды одноконтурной АЭС

Нормируемый показатель	Россия		США		Германия	
	Питательная вода	Циркуляционная вода	Питательная вода	Циркуляционная вода	Питательная вода	Циркуляционная вода
рН при 25 °С	7,0–0,2	6,5–7,2	6,5–7,5	5,6–8,6	6,5–7,5	5,6–8,6
Электропроводность Н-катионированной пробы при 25 °С, мкСм/см	<0,1	<1,0	<0,1	<1,0	<1,0	<1,0
Содержание O <sub>2</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>	<50	–	<14	–	–	–
Содержание Cl, мкг/дм <sup>3</sup>	<4,0	<100	–	<200	–	< 00
Содержание Fe, мкг/дм <sup>3</sup>	<10	<200	–	–	<25	–
Содержание Ca, мкг/дм <sup>3</sup>	<2,0	<50	<2,0	–	<3,0	–
Содержание SiO <sub>2</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>	–	–	–	–	<5,0	<400
Активность, Бк/дм <sup>3</sup>	–	10 <sup>6</sup>	–	–	–	–

Трубные пучки испарителей изготавливаются из низколегированной стали, а пароперегревателей – из нержавеющей стали аустенитного класса, весьма склонной к коррозионному растрескиванию под действием кислорода и хлор-иона. Так как хлориды могут попасть в пароперегреватель только с капельками воды (растворимость хлоридов в паре ничтожна), подача в пароперегреватель насыщенного пара исключается, для чего он перегревается в испарителях примерно на 20 °С.

Трубные пучки конденсаторов турбин, ПНД и теплообменников теплофикационной установки выполнены из медных сплавов. Все остальное оборудование, включая подогреватели высокого давления, выполнено из углеродистой стали.

Источниками загрязнений являются присосы воздуха и охлаждающей воды, подпиточная вода и коррозия оборудования, в основном трубных пучков ПНД и ПВД. Очистка всего потока конденсата турбин проводится на конденсатоочистках; конденсат греющего пара теплообменников системы регенерации и теплофикационных установок очистке не подвергается.

На блоке принят слабоаммиачно-гидразинный водный режим. Гидразингидрат первоначально вводится в конденсатный тракт для снижения коррозии трубок ПНД, а окончательно – в питательную воду для связывания остаточного после деаэраторов кислорода. Аммиак вводится после деаэратора для связывания углекислоты и поддержания строго определенного значения рН питательной воды. Дозировка реагентов, как правило, автоматизирована.

Возможны и другие варианты ввода реагентов: ввод гидразина только в конденсатный тракт, ввод аммиака в конденсатный и питательный тракты, отказ от ввода аммиака и обеспечение для питательной воды  $\text{pH} > 7$  только за счет термического разложения гидразина.

Наиболее опасным последствием нарушений водного режима является образование отложений на теплопередающей поверхности испарителей и в проточной части турбин. Отложения носят *локальный* характер, т. е. образуются не равномерно по всей поверхности оборудования, а на узком участке, например, в зоне разделения пара и воды испарителей.

В отличие от ТЭС образование отложений в трактах АЭС не может вызвать пережога трубок испарителей ввиду относительно низкой (по сравнению с топочными газами) температуры натрия. Опасность заключается в образовании за счет упаривания концентрированных растворов солей и щелочи под отложениями при протекании коррозии с образованием сквозных язвин (свищей) и попадании воды и пара в расплавленный натрий.

Для уменьшения отложений наряду со снижением содержания накипеобразующих веществ в питательной воде при пусках и остановках блока проводится водная отмывка испарителей с очисткой воды на фильтрах конденсатоочистки. Периодически (раз в 1–2 года) испарители подвергаются химической промывке.

Для снижения содержания продуктов коррозии в питательной воде перед пуском блока проводится водная отмывка конденсатно-питательного тракта как отдельно, так и совместно с испарителями. В период остановки блока с целью снижения стояночной коррозии предусматривается консервация оборудования газообразным азотом.

Нормы качества питательной воды парогенераторов АЭС с реакторами на быстрых нейтронах аналогичны нормам ТЭС с прямоточными котлами (табл. 3.4).

Таблица 3.4

**Нормы качества питательной воды парогенераторов АЭС  
с реакторами на быстрых нейтронах**

Нормируемый показатель	Значение
рН при 25 °С	9,1±0,1
Электропроводность Н-катионированной пробы при 25 °С, мкСм/см	<0,3
Жесткость, мг-экв/дм <sup>3</sup>	<0,1
Содержание O <sub>2</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>	<10
Содержание Cl, мкг/дм <sup>3</sup>	<3
Содержание Na, мкг/дм <sup>3</sup>	<5
Содержание Fe, мкг/дм <sup>3</sup>	<10
Содержание Cu, мкг/дм <sup>3</sup>	<5
Содержание N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>	20–60
Содержание SiO <sub>2</sub> , мкг/дм <sup>3</sup>	<15

Дополнительно нормируется содержание хлорид-иона ввиду использования в пароперегревателях нержавеющей аустенитных сталей.

### Контрольные вопросы к главе 3

1. Объясните, почему циркуляционная вода реакторов на быстрых нейтронах (обладает окислительными свойствами, а вода реакторов ВВЭР – восстановительными).
2. Объясните, в чем заключается отрицательный фактор радиолиза.

3. Объясните, для каких целей в воду первого контура реактора ВВЭР добавляется борная кислота.

4. Объясните, почему для нейтрализации борной кислоты используются калиевая щелочь и аммиак.

5. Чем ограничено применение нейтрального водного режима во втором контуре АЭС с реактором ВВЭР?

6. Почему необходима очистка конденсата на одно- и двухконтурных АЭС?

7. С какой целью в воду обоих контуров блока с ВВЭР добавляют аммиак и гидразин?

8. В чем заключается преимущество комплексонного водного режима?

9. Чем опасны отложения в парогенераторах АЭС с реакторами на быстрых нейтронах?



## ГЛАВА 4. ВОДОПОДГОТОВИТЕЛЬНАЯ УСТАНОВКА

### 4.1. Выбор схемы ВПУ

Выбор схемы ВПУ производится с учётом типа паропроизводящего оборудования, качества исходной воды, санитарно-гигиенических условий по возвратным водам и технико-экономических соображений. Основные положения при проектировании регламентируются действующими «нормами технологического проектирования тепловых электрических станций». На КЭС и ТЭС для подготовки добавочной воды используют, как правило, химическое обессоливание при среднем суммарном содержании анионов сильных кислот до  $5,0 \text{ мг-экв/дм}^3$ , а также при отсутствии в исходной воде специфических соединений, не удаляемых при коагуляции и известковании. При наличии таких загрязнений допускается применение испарителей.

При  $C_{\text{Cl}^-} + C_{\text{SO}_4^{2-}} + C_{\text{NO}_3^-} \geq 5 \text{ мг-экв/дм}^3$  используется химическое обессоливание в сочетании с мембранными методами обработки или термическое обессоливание. Выбор методов обработки производится на основе технико-экономического анализа [30].

В качестве исходной воды на ВПУ следует применять при соответствующем технико-экономическом обосновании воды поверхностных источников: вода артезианских скважин не питьевого назначения, вода прямоточных и циркуляционных охлаждающих систем, очищенные сточные воды электростанций, хозяйственно-бытовые сточные воды после их биологической очистки и проверки возможности использования.

При приготовлении добавочной воды для питания парогенераторов из поверхностных или артезианских источников при одинаковом солесодержании предпочтение отдаётся артезианским водам, так как их физико-химический состав устойчив в различное время года, и они прозрачны. Для артезианской воды не проводят известкование и коагуляцию. Исключается возможность старения анионитовых смол. При проектировании ВПУ с использованием открытых водоёмов (рек, озёр, водохранилищ) заранее выясняют, не угрожает ли им опасность загрязнения сточными водами предприятий, содержащими такие вещества, которые не могут быть удалены в процессе водоподготовки, но нарушают нормальную работу ТЭС. В этом случае необходимо обеспечить максимальную очистку сточных вод соседних промышленных

предприятий и максимальную очистку водоисточника, расположенного выше расположения ТЭС по течению реки. Физико-химический анализ поверхностных источников – это многолетние результаты определений, в которых ярко прослеживаются сезонные изменения. В засушливые годы жесткость воды выше, а в годы обильных осадков – ниже. Артезианские воды не требуют осветления и могут поступать непосредственно на ионитные фильтры. Неосветленные поверхностные воды, загрязненные взвешенными и коллоидными веществами, до обработки химическим обессоливанием обязательно должны пройти коагуляцию. При проектировании должны быть проанализированы и выработаны технические решения по основным вопросам:

1. Выбор способов обработки воды и режимов для различных установок и систем:

а) ВПУ для восполнения потерь в пароводяных трактах тепловых сетей, а также систем охлаждения;

б) установки по коррекционной обработке питательной и котловой воды;

в) установки по обработке циркуляционной воды (например хлораторная установка для борьбы с биообрастаниями оборудования);

г) блочные обессоливающие установки для очистки основного конденсата;

д) установки по очистке производственного конденсата и др.

2. Пароводяные балансы, балансы технической и охлаждающей воды для ТЭС и отдельно для её объектов.

3. Технико-экономическое обоснование возврата (невозврата) производственного конденсата, выбор способов и средств по предотвращению отложений и дополнительного загрязнения конденсата при транспортировке.

4. Оценка различных возможных водоисточников (поверхностных, подземных) по собранной информации по качеству и дебиту воды по сезонам.

5. Выбор методов защиты оборудования ВПУ от коррозии.

6. Отбор средств химического контроля и предварительных проб.

7. Организация лабораторий (экспресс и центральной).

8. Механизация и автоматизация процессов обработки воды и линии контроля.

9. Организация и механизация складского и реагентного хозяйства.

10. Удаление сточных вод различных типов, очистка и сокращение их объёма, повторное использование.

11. Организация рабочих мест и квалификация персонала.

12. Ремонт оборудования.

13. Штат химического цеха и отдельных его подразделений.

14. Определение капитальных и текущих затрат по различным установкам цеха, по их размерам в производстве электрической и тепловой энергии.

По влиянию на выбор схемы природные воды можно разделить на следующие типы:

- 1) осветлённые или неосветлённые;
- 2) воды с малой и повышенной общей щелочностью;
- 3) воды со щелочностью превышающей и не превышающей общую жесткость;
- 4) воды с малым, средним и высоким содержанием некарбонатных солей;
- 5) воды, содержащие и не содержащие нитриты и нитраты;
- 6) воды с большим и малым содержанием кремниевой кислоты.

Осветленные воды (артезианские, ключевые из колодцев, питьевых водопроводов) не требуют осветления и коагуляции и могут поступать непосредственно на ионитные фильтры. Неосветленные поверхностные воды, загрязненные взвешенными и коллоидными веществами, до обработки хим-обессоливанием обязательно проходят коагуляцию. Например, воды с малой  $\text{Щ}_{\text{общ}} < 2 \text{ мг-экв/дм}^3$  для парогенераторов низких и средних давлений умягчаются Na-катионированием без снижения щелочности. Если  $\text{Щ}_{\text{общ}} > 2 \text{ мг-экв/дм}^3$ , то применяется не только Na-катионирование, но H-катионирование. Снижение щелочности достигается путём известкования, H-катионирования или подкисления.

Если  $\text{Щ}_{\text{общ}} > \text{Ж}_0$ , применяют H-катионирование или подкисление. Если  $\text{Ж}_{\text{нк}} < 2 \text{ мг-экв/дм}^3$ , используют схему двухступенчатого обессоливания: H-катионирование – декарбонизация – сильноосновное анионирование; при  $\text{Ж}_{\text{нк}} - 2-8 \text{ мг-экв/дм}^3$  используют глубокое химическое обессоливание и обескремнивание:  $\text{H}_1\text{-A}_2\text{-D-H}_2\text{-A}_2$  – для барабанных котлов и  $\text{H}_1\text{-A}_2\text{-D-H}_2\text{-A}_2$  –ФСДВР для прямоточных котлов.

Если  $\text{Ж}_{\text{нк}} > 8 \text{ мг-экв/дм}^3$  – используют термическое обессоливание в испарителях или паропреобразователях.

Природные воды, содержащие значительные количества кремниевой кислоты, для питания барабанных парогенераторов подвергаются магнизальному обескремниванию или обескремниванию по методу анионного обмена в сильноосновных анионитовых фильтрах в схемах глубокого обессоливания воды.

Воды, содержащие нитриты и нитраты натрия, требуют присадки – сульфата натрия или гидразина для предотвращения кислородной коррозии, а при высоких давлениях – полного химического обессоливания.

Выбор схемы подготовки подпиточной воды должен проводиться на основе требований насыщения  $\text{CaSO}_4$  в растворённом состоянии при максимальной температуре воды. При среднегодовом суммарном содержании в исходной воде анионов сильных кислот до  $5 \text{ мг-экв/дм}^3$  независимо от метода обработки минерализованных вод применяются параллельно-точные или двухпоточно-противоточные ионитовые фильтры.

На ТЭЦ с отдачей пара на производство возможно использование паропреобразователей, вырабатывающих вторичный пар из исходных вод повышенной минерализации, что сокращает потери пара в основном цикле. При сооружении испарителя ВПУ они дополняются резервной общестанционной испарительной или обессоливающей установкой.

При невозможности сброса нейтральных стоков с ВПУ, последняя дополняется испарителями для обработки стоков или реализуются комбинированные схемы водоприготовления.

При выборе схем подготовки добавочной воды руководствуются типом котлов, их параметрами, способом регулирования температуры перегретого пара и качеством исходной воды; при соответствующем технико-экономическом анализе для ТЭС с барабанными котлами может применяться одно- или двухступенчатое обессоливание в сочетании при необходимости с мембранными процессами. Для ТЭС с прямоточными котлами применяется трёхступенчатое обессоливание с использованием в качестве третьей ступени фильтров смешанного действия с внутренней регенерацией (ФСДВР) БОУ. Для вод поверхностных источников перед обессоливанием предусматривается предочистка воды в осветлителях и механических фильтрах, причём для прямоточных котлов преимущественно проводится известкование, а для барабанных котлов его использование решается с учётом качества исходной воды и задач нейтрализации стоков.

Выбор схемы подготовки подпиточной воды для систем теплоснабжения зависит от её типа (закрытая или открытая), от наличия водогрейных котлов и определяется соответствующими нормами.

Для закрытых теплосетей с использованием водогрейных котлов на ТЭС может быть реализовано:

- 1) известкование с коагуляцией или без неё с последующим катионированием: при ограничениях по минерализации примеси рассматриваются схемы содоизвесткования;

2) известкование или содоизвесткование для вод с высокой карбонатной и некарбонатной жесткостью;

3) для закрытых сетей с подогревом воды только в основных и тепловых подогревателях возможно использование только известкования с коагуляцией или без коагуляции.

При выборе схем очистки и качества исходной воды для открытых систем горячего водоснабжения следует прежде всего помнить, что в этом случае подпиточная вода должна по своим качествам удовлетворять ГОСТ на питьевую воду.

1) Н-катионирование с «голодной» регенерацией для исходных вод, у которых  $J_K = J_0$ ;

2) подкисление серной или соляной кислотой для вод, у которых  $J_K = [J_0 - (0-3)] \text{ мг-экв/дм}^3$ ;

3) подкисление с последующим или частичным натрий-катионированием;

4) известкование или содоизвесткование с подкислением при наличии ограничения по сбросам и невозможностью ограничиться одним подкислением.

На ТЭС с барабанными котлами обычно принимаются двухступенчатые схемы обессоливания, на блоках с прямоточными котлами – трёхступенчатые схемы обессоливания добавочной воды, причём третьей ступенью является ФСД БОУ, а при использовании испарителей обязательной является доочистка дистиллята [29].

## 4.2. Расчет производительности ВПУ

Производительность ВПУ оценивается двумя методами: точным и приближённым.

1) приближённый метод:

$$Q_{\text{ВПУ}} = 3\% \cdot D_{\text{п}} + 50\% \cdot D_{\text{пр}} - 50\% \cdot D_{\text{расх.возв}},$$

где  $Q_{\text{ВПУ}}$  – производительность ВПУ,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $D_{\text{п}}$  – номинальная производительность котла (для барабанных котлов с учётом продувки 1–3 % от  $D_{\text{п}}$ ),  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $D_{\text{пр}}$  – расхода пара, отдаваемого на производство,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $D_{\text{расх. невоз}}$  – расход возвратного конденсата,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;

2) полный метод.

Производительность ВПУ равна 2 % от паропроизводительности котлов, учитывает восполнение нерасчетных потерь (первичный пуск, расход конденсата на создание запаса для химических промывок,  $D_{п}$ , собственные нужды БОУ), расход пара на разогрев мазута,  $D_{м}$  и 50 % расход пар, отдаваемого на производство, за вычетом 50 % невозврата  $D_{расх. невоз}$ :

$$Q_{ВПУ} = 2 \% \cdot D_{п} + \text{соб. нужды} + D_{м} + 50 \% \cdot D_{пр} - 50 \% \cdot D_{расх. невоз}, \text{ т/ч.}$$

Потери пара и конденсата на ГРЭС и отопительной ТЭЦ принимают равными 2 % от паропроизводительности котлов. При выборе производительности ВПУ кроме расчетных потерь, т.е. сверх 2 %, для выполнения нерасчетных потерь (первичный пуск, расход конденсата на создание запасов для химических промывок, собственные нужды БОУ и т.д.) производительность ВПУ или общестанционной резервной испарительной установки увеличивается для блоков с прямоточными котлами мощностью 200, 250, 300 мВт дополнительно на 25 т/ч, с мощностью 500 мВт – на 50 т/ч, с мощностью 800 мВт – на 75 т/ч, для электростанций с барабанными котлами такой же мощности – на 25 т/ч (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Надбавка зависящая от типа котла и мощности энергоблока

Производительность блоков, мВт	Прямоточные котлы	Барабанные котлы
250–300	25 т/ч	25 т/ч
500	50 т/ч	25 т/ч
800	75 т/ч	25 т/ч

При использовании пара на разогрев мазута (без возврата конденсата) расчётное значение потерь для газомазутных станций сжигаемого мазута принимается равным 0,15 т на одну тонну мазута.

### 4.3. Компонировка помещений ВПУ

При проектировании комплекса ВПУ предусматривается максимальная его компоновка со складскими помещениями и очистными сооружениями, а также возможность дальнейшего расширения с учётом подвода реагентов к складу без промежуточной перегрузки. Компоновки ВПУ представлены в двух вариантах. При размещении вне

здания осветлители, промежуточные баки, декарбонизатор следует покрыть тепловой изоляцией, а для баков предусмотреть обогрев с использованием, как правило, оборотной воды тепловой сети. В помещении ВПУ предусматривается комната не менее  $50 \text{ м}^2$  для ремонтных работ и восстановления химических покрытий.

При компоновке оборудования ВПУ необходимо предусматривать:

- а) максимальную компоновку его с очистными сооружениями и со складскими помещениями,
- б) возможность дальнейшего расширения ВПУ,
- в) возможность подвоза реагентов к складу без промежуточной перегрузки на территории электростанции.

Целесообразность размещения вне здания осветлителей, декарбонизаторов и баков определяется технико-экономическими расчетами с учетом использования обогрева, тепловой изоляции и размещения аппаратуры для управления в закрытом помещении.

При питании обессоливающей установки водой поверхностного источника её предварительная очистка производится в осветлителях с коагуляцией и известкованием и на механических фильтрах, причем устанавливаются не менее двух осветлителей, а колебания температуры воды, поступающей в осветлитель, не должны превышать  $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Вместимость баков осветлённой воды должна быть рассчитана на часовой запас и на возможность промывки одного механического фильтра в течение 20 мин. При повторном использовании вод для взрыхления механических фильтров устанавливаются специальный бак и насос для равномерной в течение суток подачи воды со взвесью в осветлитель. Дозирование растворов и суспензий производится насосами-дозаторами. Устанавливаются рабочий и резервный насосы для каждого реагента. Для каждого реагента используется, также не менее двух расходных ёмкостей растворов и суспензий суммарной вместимостью в размере 12–24 часового расхода. На основании опыта эксплуатации ВПУ при выборе числа и размеров фильтров принимается: скорость фильтрования воды: в механических фильтрах – 10 м/ч, при отсутствии осветлителей – 5–7 м/ч, в катионитных фильтрах 2-й ступени и в ФСД с внутренней регенерацией – 40–50 м/ч, в анионитных фильтрах с анионитом АН-31 – 15–20 м/ч, во всех остальных ионитных фильтрах – 20–30 м/ч, высота слоя загрузки анионитов, сильно- и слабокислотных катионитов – не менее 0,8 м, сульфоугля – не менее 1 м; расчётное количество регенераций каждого фильтра при выводе в ремонт одного из одноименных фильтров не более трех и не менее одной в сутки в зависимости от степени автоматизации водоочистки.

В качестве резервного оборудования предусматривается установка механического, катионитного и анионитного фильтров гидроперезагрузки с подводом к ним соответствующих растворов реагентов и сжатого воздуха.

На ТЭС с барабанными котлами обычно применяются двухступенчатые схемы обессоливания, на блоках с прямоточными котлами – трёхступенчатые схемы обессоливания добавочной воды, причём 3-й ступенью являются ФСД БОУ, а при использовании испарителей обязательной является доочистка дистиллята.

При проектировании схем подготовки подпиточной воды тепловой сети следует учитывать тип системы (закрытый или открытый), а также наличие или отсутствие водогрейных котлов, требующих повышенного качества нагреваемой воды. Для ТЭЦ с водогрейными котлами применяется известкование с коагуляцией и последующее катионирование. При ограничении минерализованных стоков рассматривается возможность содоизвесткования. При подогреве воды только в основных и пиковых сетевых подогревателях допустимо использование только известкования с коагуляцией или без неё.

Вода для подпитки открытых систем теплоснабжения готовится из воды питьевого качества по следующим технологическим схемам: Н-ка-тионирование с «голодной» регенерацией для вод с  $J_{\text{O}} = J_{\text{K}}$ ; подкисление для вод с  $J_{\text{K}} = J_{\text{O}} - (0-3) \text{ мг-экв/дм}^3$ ; подкисление с частичным Na-катионированием, при ограничениях сброса и невозможности удовлетвориться одним подкислением, последнее дополняют известкованием или содоизвесткованием.

Так как обычно в состав ВПУ входят системы различного назначения (добавочная вода котлов, тепловой сети, питательная вода испарителей и т.д.), то для повышения надёжности эксплуатации этих систем предусматривается переключки между отдельными группами одноименного оборудования.

Проектируя склады реагентов ВПУ, следует учитывать, что при доставке реагентов железнодорожным транспортом вместимость складов должна соответствовать приёму не менее одного 60-тонного вагона или цистерны при наличии на складе к моменту разгрузки 15-суточного запаса соответствующего реагента; общий запас должен быть не менее чем на месяц. Для хранения кислот и щелочей устанавливается не менее двух баков для каждого реагента, известь хранится в сухом виде, коагулянт и соль обычно хранятся в подземных ячейках в мокром виде. При доставке реагентов автотранспортом или по трубопроводу запас реагентов



принимается не менее, чем на 15 суток. На складе сооружаются устройства для механизированной выгрузки реагентов из вагонов и цистерн, механизированной внутрискладской транспортировки и приготовления рабочих растворов и суспензий с очисткой их от посторонних примесей.

В результате совершенствования проектов ВПУ внедрён ряд технических решений по использованию комбинированных схем и многоярусных компоновок, сокращающих площадь застройки, трудозатраты и сроки строительства. Преимуществами компоновки комплекса ВПУ в главном корпусе являются сокращение межцеховых соединительных коммуникаций, общей площади фильтровального зала и возможность обслуживания грузоподъемными механизмами энергетической части станции, что облегчает условия монтажа, эксплуатации и ремонта оборудования ВПУ.

#### **Контрольные вопросы к главе 4**

1. От чего зависит выбор схемы ВПУ?
2. При каких условиях на КЭС и ТЭС для подготовки добавочной воды используют химическое обессоливание?
3. При каких условиях на ТЭС и КЭС для подготовки добавочной воды используют химическое обессоливание в сочетании с мембранными методами обработки или термическое обессоливание?
4. Перечислите воды, которые могут быть использованы в качестве исходных вод на ВПУ
5. От чего зависит производительность ВПУ для КЭС и ТЭС?
6. Зарисуйте схему химического обессоливания, которая применяется на электростанциях с барабанными котлами.
7. Зарисуйте схему химического обессоливания, которая применяется на электростанциях с прямоточными котлами.
8. Зарисуйте схему подготовки воды для подпитки тепловой сети, для ТЭС с барабанными котлами низкого давления
9. Зарисуйте схему подготовки воды для испарителей ТЭС с барабанными котлами среднего давления.

## ГЛАВА 5. ПРОЦЕССЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ОЧИСТКИ ВОДЫ НА ВОДОПОДГОТОВИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ

На электростанциях предварительную очистку воды применяют для подготовки добавочной воды котлов высокого и сверхвысокого давления перед химическим обессоливанием. Предварительная очистка воды предназначена для снижения окисляемости, удаления грубодисперсных примесей. Это необходимо для повышения надёжности, экономичности работы ионитной части ВПУ. Присутствие органических примесей приводит к старению анионитов, снижает глубину очистки и увеличивает расход реагентов на регенерацию анионитов. Предварительная очистка воды проводится перед катионированием для снижения карбонатной жесткости, удаления органических и железистоокисных соединений.

Водоподготовительная установка включает предочистку и ионитное химическое обессоливание. Предочистка проходит в два этапа:

- очистка воды в осветлителях;
- доочистка воды на механических (осветлительных) фильтрах.

В осветлителях протекает два важных процесса: известкование и коагуляция. Для организации процесса известкования и коагуляции необходим учёт основных факторов, определяющих оптимальное осуществление технологии: оптимальная доза вводимых реагентов, оптимальная температура процесса, оптимальное значение рН, перемешивание.

### 5.1. Физико-химические основы коагуляции

Коагуляция – физико-химический процесс укрупнения коллоидных частиц за счёт их слипания под действием межмолекулярных сил притяжения. Коагуляция – технологический процесс обработки воды реагентами. Реагенты, используемые при коагуляции, называются коагулянтами. В качестве коагулянтов используют минеральные соли поливалентных металлов. Согласно правилу Шульце–Гарди: чем больше заряд коагулирующей частицы, тем выше коагулирующая способность. Наибольшее распространение в качестве коагулянтов получили соли сернистого алюминия и железа  $Al_2(SO_4)_3$ ,  $Fe_2(SO_4)_3$  и  $FeSO_4$ . В водоподготовке применяются оксихлориды алюминия, алюминаты, хлориды титана, хлориды железа. Теория коагуляции имеет множество трактовок определений [1].

Авторы данного учебного пособия предлагают студентам объяснять коагуляцию с позиции теории двойного электрического слоя (ДЭС).

В соответствии с данной теорией, в результате коагуляции образуются коллоидные системы. Современная теория строения ДЭС (теория Гуи и Чепмена) представляет его в виде двух частей (рис. 5.1).

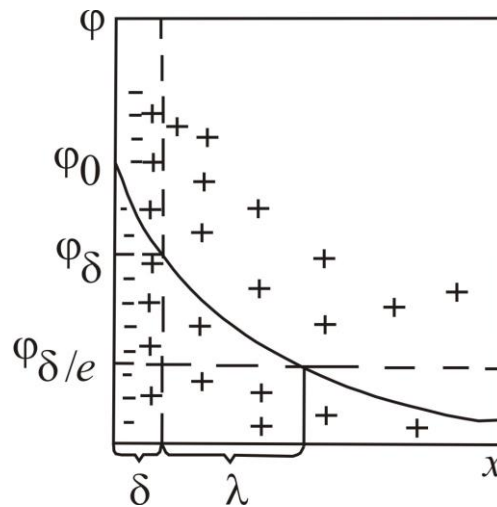


Рис. 5.1. Двойной электрический слой и изменение в нем потенциала

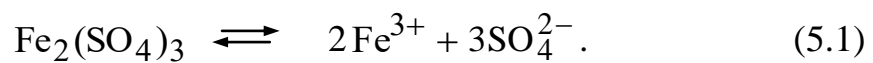
Одна его часть находится непосредственно у межфазной поверхности и образует слой Гельмгольца толщиной  $\delta$ , соответствующий диаметру гидратированных ионов, находящихся в нём. Остальная часть противоионов находится в диффузной части толщиной  $\lambda$ , зависящей от свойства и состава раствора и коллоидной системы. Значение потенциала в слое Гельмгольца при удалении от потенциалообразующих ионов снижается линейно от  $\varphi_0$  до потенциала диффузного слоя  $\varphi_\delta$ , затем изменяется экспоненциально. В коллоидных системах ДЭС возникает на поверхности частиц. Частицу дисперсной фазы вместе с ДЭС называют мицеллой. Внутреннюю часть мицеллы составляет агрегат основного вещества, на поверхности которого расположены потенциалообразующие ионы. Агрегат с потенциалообразующими ионами образуют ядро мицеллы. Ядро с противоионами плотной части ДЭС составляют гранулу. Заряженная гранула, окруженная противоионами диффузного слоя, представляется электронейтральной мицеллой. При движении коллоидных частиц в воде происходит разрыв ДЭС по плоскости скольжения. Часть диффузного слоя захватывает частица, а часть ионов остается в растворе, в результате устанавливается разность потенциалов между движущейся коллоидной частицей и окружающей её средой на поверхности скольжения при отрыве частиц диффузного слоя. Потенциал на поверхности скольжения называется электрокинетическим потенциалом, или  $\xi$  (дзета)-потенциалом. Электрокинетический потенциал экспериментально определяют методом электрофореза;  $\xi$ -потенциал коллоидов природных вод составляет 70 мВ.

Коллоидные системы в природных водах имеют обычно одинаковый отрицательный заряд и характеризуются агрегативной устойчивостью, т.е. стабильностью дисперсности, распределением по объёму и взаимодействием между частицами.

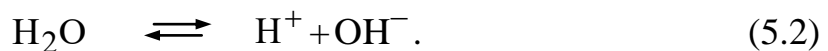
Потеря дисперсной системой агрегативной устойчивости, заключающаяся в слипании частиц, и представляет собой коагуляцию.

Добавление коагулянта в водный раствор приводит к диссоциации соли и трехступенчатому гидролизу. Рассмотрим эти процессы на примере раствора коагулянта  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$ .

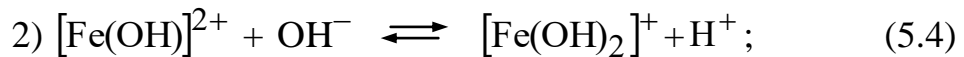
I. Стадия диссоциации молекул коагулянта:



Вода – слабый электролит:



II. Трёхступенчатый гидролиз:



Процесс гидролиза коагулянта приводит к образованию труднорастворимого соединения – гидроксида железа  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ , который и образует коллоидный раствор с положительным дзета-потенциалом. Основными факторами, влияющими на процесс коагуляции примесей воды в объёме, являются: температура и щелочность воды, рН, анионный состав воды, правильный выбор дозы коагулянта, быстрота его смешивания и равномерность распределения в воде естественных взвесей, условия процесса хлопьеобразования.

**Влияние рН на коагуляцию.** В зависимости от рН воды состав коагулянта претерпевает изменения. Если в обрабатываемой воде содержание ионов металла коагулянта превышает растворимость его соединений при данном рН, то это вызывает его перенасыщение, ведущее

к образованию отложений в трубопроводах. При коагуляции сернокислым алюминием оптимальное значение рН находится в пределах 5,0–7,5. При  $\text{pH} < 4,5$  гидролиз  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  практически не происходит, гидроксид алюминия не образуется, а введенный в воду коагулянт остается в растворе в виде ионов  $\text{Al}^{3+}$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ . В щелочной среде образовавшийся в процессе гидролиза гидроксид алюминия растворяется с образованием алюминатов. Оптимальный рН, при котором используют  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , равен 6,5–7,5.

$\text{Fe}(\text{OH})_3$  не обладает амфотерными свойствами и диапазон рН его образования шире, чем для  $\text{Al}(\text{OH})_3$ :  $\text{pH} = 8\text{--}10,4$ .

**Влияние анионного состава воды на коагуляцию.** Частицы  $\text{Al}(\text{OH})_3$  и  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  в слабокислой и нейтральной среде сорбируют катионы водорода и алюминия (или железа), приобретают положительный заряд. В результате коагуляций примесей воды происходит их адсорбция и адгезия на поверхности гидроксидов, осаждение которых осуществляется в результате электролитной коагуляции солей, находящихся в обрабатываемой воде. Следовательно, анионный состав воды оказывает существенное влияние на электронную коагуляцию гидроксидов металлов при гидролизе в момент их формирования [30].

Подчеркивают коагулирующее влияние сульфат-ионов  $\text{SO}_4^{2-}$ . Так, при коагуляции примесей в воде с содержанием до 100 мг/л процесс протекает вяло. Добавка сульфат-ионов ускоряет коагуляцию, расширяет зону оптимальных значений рН в сторону понижения. Максимальная скорость коагуляции обусловлена пороговыми концентрациями в воде следующих ионов: хлор-ионов – 0,07 н., гидроксильных ионов – 0,1–0,3 н., бикарбонатных ионов – 0,005 н., сульфат-ионов – 0,001–0,002 н. Следовательно, коагуляция гидроксидов определяется наличием в природных водах бикарбонатных и сульфатных ионов, а поскольку их концентрации ниже пороговых, то и процесс коагуляции протекает менее интенсивно.

**Выбор дозы коагулянта.** Правильный выбор дозы коагулянта очень важен при проведении коагуляции. Под дозой коагулянта подразумевается определенное массовое количество реагента, которое добавляется к единице объема обрабатываемой воды. Выбор вида и эксплуатационной дозы коагулянта производится на основе результатов пробной коагуляции воды различными реагентами, проводимой в лабораторных условиях в характерные для источника водоснабжения периоды года. Выбор дозы коагулянта в зависимости от химического состава исходной воды приводится в физико-химическом расчете стадии предочистки (Приложение).

**Влияние щелочности воды на процесс коагуляции.** Под общей щёлочностью подразумевают сумму анионов слабых кислот и гидроксильных ионов за вычетом концентрации ионов водорода:

$$\begin{aligned} \text{Щ}_0 &= \sum C_{\text{ан}}^{\text{сл.к}} + C_{\text{ОН}^-} - C_{\text{Н}^+}, \\ \sum C_{\text{ан}}^{\text{сл.к}} &= \\ C_{\text{НСО}_3^-} + C_{\text{СО}_3^{2-}} + C_{\text{НСиО}_3^{2-}} + C_{\text{СиО}_3^{2-}} + C_{\text{РО}_4^{3-}} + C_{\text{НРО}_4^{2-}} + C_{\text{Н}_2\text{РО}_4}. \end{aligned}$$

При введении в обрабатываемую воду коагулянта, например  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , образуется  $\text{Al}(\text{OH})_3$ , который при обычных значениях рН воды не только коагулирует сам, но и вызывает коагуляцию агрегативно устойчивых примесей воды путем взаимной адсорбции. рН воды при коагуляции повышается, приводит к снижению скорости гидролиза сульфата алюминия. Поэтому щелочной резерв должен быть достаточным. Критерием достаточности естественной щелочности воды может быть:

$$\Delta\text{Щ} = \frac{\text{Щ}_0 \cdot (10^{\Delta\text{pH}} - 1)}{1 + K_I \cdot 10^{\text{pH}_0 + \Delta\text{pH} + \mu^{0,5}}},$$

где  $\Delta\text{Щ}$  – доза щелочи (при подщелачивании) или кислоты (при подкислении), мкг-экв/дм<sup>3</sup>;  $\text{Щ}_0$  – щелочность исходной воды, мкг-экв/л;  $\text{pH}_0$  – рН исходной воды;  $\Delta\text{pH}$  – изменение рН (при подщелачивании – положительная при подкислении – отрицательная);  $K_I$  – константа I степени диссоциации  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,  $\mu$  – ионная сила раствора.

### **Влияние температуры воды на процесс коагуляции её примесей**

Молекулы воды, а также частицы её примесей находятся в тепловом броуновском движении, интенсивность которого прямо пропорциональна температуре воды. Для ускорения процесса коагуляции коагулируемую воду подогревают до 30–40 °С. Повышение температуры выше 40 °С ухудшает эффект осветления из-за быстрого броуновского движения коллоидных частиц и замедления их адсорбции хлопьями.

**Влияние условий перемешивания воды на процесс коагуляции её примесей.** Для ускорения процесса коагуляции применяется перемешивание (вода + коагулянт), благодаря чему коллоидные частицы загрязнений и коагулянта испытывают более частые и сильные

столкновения, приводящие к их слипанию. Слипание и формирование плотных хлопьев обеспечивается созданием оптимальных условий для дальнейшего укрупнения первичных агрегатов. Однако перемешивание не должно производиться слишком энергично, чтобы не разрушить образовавшиеся хлопья. Равномерное распределение коагулянта по всей массе воды обеспечивает надлежащий эффект коагуляции.

**Влияние на процесс коагуляции содержания в исходной воде естественных взвесей.** Конечным продуктом коагуляции являются хлопья, которые выделяются при осаждении. По своей структуре хлопья представляют собой цепочки гидроксидов металлов, на поверхности которых адсорбированы коллоидные и мелкодисперсные примеси. При этом грубодисперсные примеси являются центрами коагуляции, способствуя не только ускорению процесса, но и формированию более крупных и плотных хлопьев, которые выпадают в осадок.

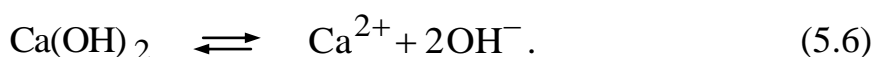
Существуют и вспомогательные процессы, которые обеспечивают интенсификацию и повышение технико-экономической эффективности процесса коагуляции. Это процесс флокуляции – процесс агрегации частиц, в котором при непосредственном контакте частиц происходит их адсорбционное взаимодействие с молекулами высокомолекулярных веществ, называемых флокулянтами. Из неорганических флокулянтов используется кремниевая кислота; природными флокулянтами являются крахмал, карбоксил-метилцеллюлоза, полиакриламид.

## 5.2. Физико-химические основы известкования

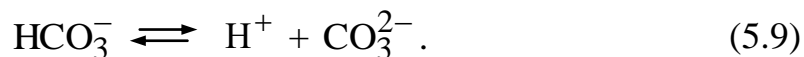
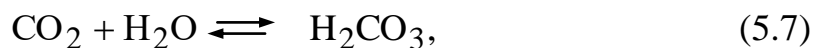
Известкование – обработка воды раствором известкового молока (гашеной известью)  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ .

Известкование – метод осаждения, который основан на выведении из раствора отдельных примесей в виде труднорастворимых соединений (в виде твёрдой фазы). При известковании воды в труднорастворимые соединения могут быть переведены следующие примеси: свободная углекислота  $\text{CO}_2$ , бикарбонат-ионы  $\text{HCO}_3^-$ ; катионы кальция и магния. Известкование рассматривают как метод декарбонизации (удаление  $\text{CO}_2$ ), как метод снижения щелочности (удаление  $\text{HCO}_3^-$ ) и как метод частичного умягчения (снижения общей жёсткости).

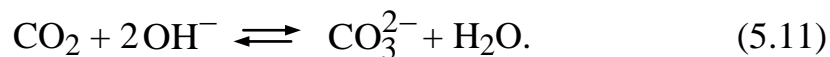
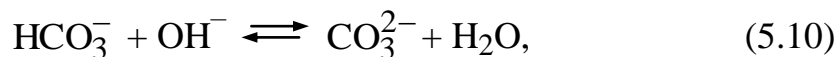
В результате диссоциации известки в воде повышается рН воды:



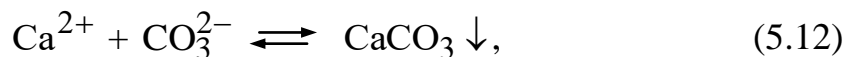
Углекислотное равновесие в природной воде смещается вправо:



При добавлении известкового молока вся свободная углекислота и бикарбонат-ионы могут быть переведены в карбонат-ионы  $\text{CO}_3^{2-}$ :



Повышение в воде концентрации карбонат-ионов приводит к образованию труднорастворимых соединений:



Образование осадков возможно, если произведение равновесных концентраций катионов и анионов их образующих превышает произведение растворимости:

$$[\text{Ca}^{2+}] \cdot [\text{CO}_3^{2-}] > \text{ПР}_{\text{CaCO}_3};$$

$$[\text{Mg}^{2+}] \cdot [\text{CO}_3^{2-}] > \text{ПР}_{\text{MgCO}_3};$$

$$[\text{Mg}^{2+}] \cdot [\text{OH}^-] > \text{ПР}_{\text{Mg}(\text{OH})_2}.$$



Вводимые в воду гашеной известью ионы  $\text{OH}^-$  (5.6) необходимы:

- 1) для перехода  $\text{CO}_2$  в  $\text{CO}_3^{2-}$ ;
- 2) для перехода  $\text{HCO}_3^-$  в  $\text{CO}_3^{2-}$ ;
- 3) для перевода  $\text{Mg}^{2+}$  в  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ .

Все реакции, протекающие при известковании воды, обратимы: для смещения их в нужном направлении необходимо вводить избыток извести, равный  $d_{\text{Ca}(\text{OH})_2} = 0,2 \text{ мг-экв/дм}^3$ . Поэтому потребная доза извести при известковании составляет:

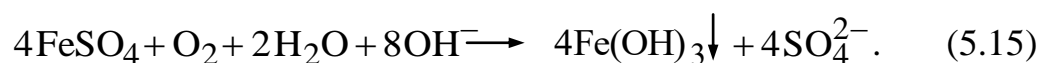
$$D_{\text{Ca}(\text{OH})_2} = C_{\text{CO}_2}^{\text{исх}} + C_{\text{HCO}_3^-}^{\text{исх}} + \Delta C_{\text{Mg}^{2+}} + d_{\text{Ca}(\text{OH})_2} + D_{\text{к}};$$

$$\Delta C_{\text{Mg}^{2+}} = C_{\text{Mg}^{2+}}^{\text{исх}} - C_{\text{Mg}^{2+}}^{\text{кон}}.$$

Эффективность процесса известкования воды зависит от ряда факторов, к основным из которых относятся правильное дозирование извести, подогрев воды до строго заданной температуры, использование образовавшегося шлама для углубления процесса обработки, выбор оптимальных режимов движения обрабатываемой воды в осветлителях. Технологический процесс известкования воды широко применяется на ТЭС для вод с щелочностью, превышающей  $1,5 \text{ мг-экв/дм}^3$ .

### 5.3 Аппараты и схемы предварительной очистки воды

Коагуляцию и известкование воды проводят в одном аппарате – осветлителе по технико-экономическим соображениям. Коагуляцию в осветлителях на ВПУ ТЭС проводят 8 % раствором сульфата двухвалентного железа, известкование – 8 % раствором известкового молока  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . При введении в воду в качестве коагулянта  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  наряду с гидролизом происходит дальнейшее доокисление железа  $\text{Fe}^{2+}$  растворённым в воде кислородом с образованием гидроксида железа:



Исходная вода, подогретая до 40 °С, поступает в осветлитель вместе с раствором коагулянта и известкового молока. В трубопровод с исходной водой перед осветлителем вводится раствор кислоты или щелочи для создания оптимального значения рН; если применяется сульфат двухвалентного железа, вводят раствор хлора для доокисления двухвалентного железа в трехвалентное. В осветлителе происходит хлопьеобразование и осветление воды. Для создания оптимальных условий очистки воды конструкция осветлителей должна обеспечивать: быстрое и полное смешивание обрабатываемой воды и реагентов; благоприятные режимы для формирования шламовой контактной среды во взвешенном состоянии и в определённых границах по высоте; удаление излишков шламового осадка продувочной водой; возможность контроля и оперативного изменения условий очистки эксплуатационным персоналом. Перечисленным требованиям удовлетворяют осветлители нормального ряда, разработанные ВТИ, ЦНИИ (табл. 5.1).

Таблица 5.1

## Нестандартное водоподготовительное оборудование [27]

Тип	Производительность, м <sup>3</sup> /ч	Диаметр, мм	Высота, мм	Масса конструкции, кг
Осветлители для известкования				
ВТИ-63	63	4250	1020	8,0
ВТИ-100	100	550	10690	13,5
ВТИ-160	160	7000	12247	19,3
ВТИ-250	250	9000	13524	32,6
ВТИ-400	400	11000	14889	49,5
ВТИ-630	630	14000	17492	86,7
ВТИ-1000	1000	16000	19740	147,0
Осветлители для коагуляции				
ЦНИИ-2	100	700	9900	22,6
ЦНИИ-2	150	7300	6905	21,9
ЦНИИ-2	230	9000	7650	36,3
ЦНИИ-2	350	12000	11600	75,0
ЦНИИ-2	450	12500	8650	57,9

Исходная подогретая вода поступает в воздухоотделитель, затем в смеситель воды и реагентов. Ввод реагентов в смеситель выполняется последовательно, известковое молоко вводится выше исходной воды, раствор коагулянта – выше известкового молока. Такая последовательность ввода обусловлена технологическими условиями взаимодействия воды и реагентов. Ввод воды снабжен устройством для изменения площади выходного сечения с целью создания оптимальной

скорости по условиям формирования контактной среды при данной нагрузке. Процессы химического взаимодействия реагентов с растворёнными в воде веществами завершаются в нижней части осветлителя на выходе из смесителя, и здесь же начинается выделение продуктов этого взаимодействия – шлама. Верхняя граница взвешенного шлама должна находиться на уровне верхней кромки приёмных окон шламоуплотнителя. В шламоуплотнитель через приемные окна отводится до 20 % воды со шламом. Шлам оседает в нижней части шламоуплотнителя и затем выводится вместе с продувкой в дренаж, а осветленная вода отводится в распределительное устройство и далее – в поток осветленной воды. До 80 % общего расхода воды проходит помимо шламоуплотнителя, сливается в кольцевой желоб и через распределительное устройство направляется в промежуточный бак. Для сбора песка, поступающего с исходной водой, и кристаллов  $\text{CaCO}_3$  служит грязевик, в качестве которого используется нижняя часть конического днища смесителя, ниже уровня выходного сопла. Тяжелые частицы песка и шлама удаляются из грязевика при периодических продувках. Осветлитель оборудован устройствами для отбора проб воды на анализ и линиями подачи воды к датчикам систем автоматического регулирования и дистанционного измерения «отсечки». Всего установлено 15 пробоотборных точек, в том числе 9 для ручного анализа проб и 6 к приборам автоматического контроля: к рН-метру, сигнализатору уровня шлама (СУШ), мутномеру, расходомеру отсечки. По точкам ручного контроля определяют: качество исходной воды, воды из зоны смешения и известкованной воды. Кроме того, контролируют положение уровня контактной среды непосредственно в осветлителе и уровня осадка в шламоуплотнителе. Для коагулирования воды на электростанциях применяют осветлители с контактной средой из взвешенного шлама типов ЦНИИ-1 и ЦНИИ-2 (рис. 5.2), во многих случаях они работают удовлетворительно при производительности 60–70 % от номинальной. Основные причины неудовлетворительной очистки воды в этих аппаратах при номинальной производительности – недостаточные размеры высоты и сечения воздухоотделителей и зоны контактной среды. Проектная скорость движения воды и длительность её пребывания в воздухоотделителе не обеспечивают достаточного удаления воздуха из воды. Расчетная скорость восходящего движения воды в осветлителях велика. В этих условиях эксплуатации осветлитель очень чувствителен к изменениям нагрузки и температуры [3].

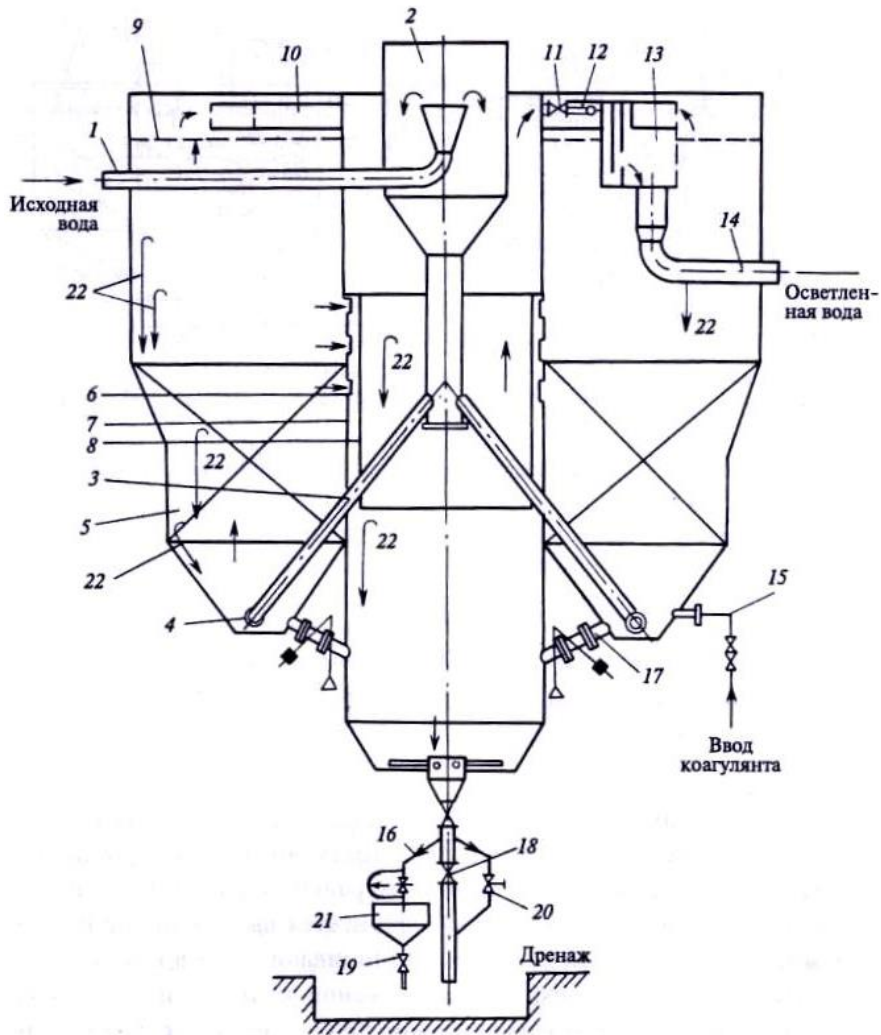


Рис. 5.2. Схема осветлителя для коагуляции типа ЦНИИ-2: 1 – вход воды; 2 – воздухоотделитель; 3 – распределительная труба; 4 – сопло; 5 – вертикальная перфорированная перегородка; 6 – шламоприемные окна; 7 – шламоуловитель; 8 – «стакан»; 9 – верхняя распределительная перегородка; 10 – сборный кольцевой желоб; 11 – задвижка отсечки; 12 – трубопровод отсечки; 13 – распределительное устройство с успокоительной перегородкой; 14 – выход обработанной воды; 15 – ввод коагулянта; 16 – линия непрерывной продувки; 17 – линия периодической продувки; 18 – задвижка на линии опорожнения осветлителя; 19 – дренажная задвижка; 20 – кран с сервоприводом; 21 – воронка; 22 – пробоотборные точки

С целью приближения производительности осветлителей к проектной предложен ряд мероприятий по усовершенствованию их конструкции. В основном они сводятся к реконструкции воздухоотделителя для более эффективного удаления из воды воздуха. Так, скорость нисходящего движения воды в воздухоотделителе снижена со 100 до 25 м/ч, а длительность пребывания увеличена с 45 с до 5 мин. Увеличение зоны контактной среды достигается перекрытием нижнего ряда окон и увеличением сечения верхних для создания в них скорости не более 5 мм/с.

Указанные недостатки исключены в осветлителях модификации ВТИ, где приняты: скорость движения воды в воздухоотделителе не более 25 м/с, длительность пребывания в нём не менее 5 мин, высота защитной зоны не менее 1,5–2,0 м. Скорость ввода воды в осветлитель должна приниматься в зависимости от исходной мутности обрабатываемой воды в пределах 0,5–1,75 м/с, с увеличением значения этого показателя при нарастающей мутности воды. Удельную площадь поперечного сечения зоны осветления шламоуплотнения в процентах площади поперечного сечения зоны контактной среды осветлителя рассчитывают:

$$B = \frac{K_u}{10 \cdot \gamma_o \cdot C_o} - q_{\text{пр}},$$

где  $K_u = M + 26 D_k$  – количество образующегося осадка, мг/дм<sup>3</sup> сухого вещества;  $\gamma_o$  – условная объёмная масса частиц контактной среды, мг/мл;  $C_o$  – объёмная концентрация осадка в контактной среде осветления, мл/мл;  $q_{\text{пр}}$  – размер продувки, % расчетной производительности осветлителя;  $M$  – содержание взвеси в исходной воде, мг/дм<sup>3</sup>,  $D_k$  – доза коагулянта. Для сбора известкованной и коагулированной воды непосредственно после осветлителей устанавливаются баки. Полезную ёмкость баков известкованной воды принимают равной часовой производительности осветлителя.

#### 5.4. Осветлительные фильтры

Удаление грубодисперсных загрязнений осуществляется в осветлительных (механических) фильтрах, которые классифицируются: по расположению корпуса – вертикальные и горизонтальные; по числу камер – одно-, двух- или трехкамерные; по числу видов фильтрующей загрузки – одно- и двухслойные. На ВПУ применяются напорные вертикальные (одно, двух или трехкамерные) или горизонтальные фильтры.

Принцип работы фильтров основан на механическом задерживании фильтрующим материалом нерастворимых примесей воды. Фильтрующий материал должен иметь определенный гранулометрический состав, не должен обогащать воду в процессе фильтрования примесями (железом, солями, кремнекислотой, органическими соединениями и т.д.), должен иметь минимальную истираемость, не более 1 % в год, и измельчаемость не более 5 % в год. В качестве фильтрующего материала используют дробленый антрацит, песок, кварц, мрамор и полукокс. Интенсивность

работы осветлительных фильтров определяется скоростью фильтрования и фракционным составом загрузки. Скорость фильтрования обычно выдерживают в пределах 5–7 м/ч (по сечению фильтра) и в отдельных случаях до 10 м/ч. При повышенной скорости фильтрования не образуется равномерная пленка на поверхности фильтрующего материала, и осветление воды происходит только за счет оседания загрязнений в толще загрузки. Эффективность очистки при этом снижается. Типы, основные параметры и размеры осветлительных фильтров ВПУ представлены в табл. 5.2.

Таблица 5.2

### Основные характеристики осветлительных и сорбционных фильтров

Тип	Изготовитель	Высота слоя, м	Производительность, м <sup>3</sup> /ч	Масса конструкции, кг
ФОВ-1,0-0,6	БиКЗ	1,0	10	885
ФОВ-1,5-0,6	БиКЗ	1,0	23	1468
ФОВ-2,5-0,6	ПО КН	1,0	30	2150
ФОВ-2,6-0,6	ПО КН	1,0	50	3690
ФОВ-3,0-0,6	ПО КН	1,0	70	4790
ФОВ-3,4-0,6	ПО КН	1,0	90	6210
ФОВ-2К-3,4-0,6	ПО КН	0,9×2	200	10540
ФОВ-3К-3,4-0,6	ПО КН	0,9×3	300	14650
ФС-2,0-0,6	ПО КН	2,5	20	2960
ФС-2,6-0,6	ПО КН	2,5	40	4580
ФС-3,0-0,6	ПО КН	2,5	50	5860
ФС-3,4-0,6	ПО КН	2,5	60	7180
ФИС-3,4-1,0	ПО КН	1,0	450	8500
ЭМФ-3,4-1,0	ПО КН	1,3	1000	14300
ЭМФ-1,1-1,5	ПО КН	1,3	1000	14500
ЭМФ-1,1-2,5	ПО КН	1,3	1000	15000

Пример условных обозначений: ФОВ-2,0-0,6 – фильтр осветлительный вертикальный диаметром 2 м, на давление 0,6 МПа, ФС – фильтр сорбционный, ФИС – фильтр ионитный смешанный, ЭМФ – электромагнитный фильтр

Вертикальный однокамерный фильтр состоит из корпуса, верхнего и нижнего распределительных устройств, фильтрующей загрузки и системы трубопроводов (подвода обрабатываемой воды, отвода осветленной воды, сброса воды в дренаж и подвода сжатого воздуха). Каждый фильтр оборудован двумя манометрами (на входе и выходе воды), двумя пробоотборными точками и расходомером, установленным после фильтра (рис. 5.3).

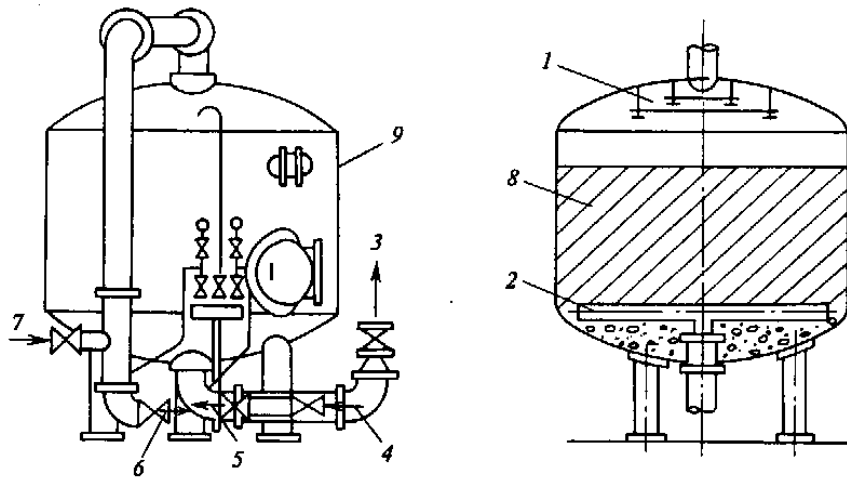


Рис. 5.3. Фильтр осветлительный вертикальный однокамерный:

- 1 – верхнее распределительное устройство; 2 – нижнее дренажно-распределительное устройство; 3 – фильтрат; 4 – сжатый воздух, промывочная вода; 5 – спуск первых порций фильтрата; 6 – спуск промывочной воды; 7 – исходная вода; 8 – фильтрующий слой; 9 – корпус фильтра

Вертикальные двух- и трёхкамерные фильтры аналогичны однокамерным, но имеют две или три рабочие камеры, работающие параллельно. Промывка фильтров производится отдельно для каждой камеры. Верхнее распределительное устройство выполнено в виде воронок, дырчатых труб и отстойных щитков, нижнее – в виде щелевых труб или труб с перфорированными желобками. Размеры щелей 0,4×6 мм. Пространство от днищ фильтра до нижнего распределительного устройства заполняют щебнем и сверху заливают бетоном на гидравлическом цементе. Поверхность бетона защищают от коррозии стойким покрытием.

Конструкции горизонтального и вертикального фильтров принципиально не отличаются. Горизонтальные фильтры имеют большую рабочую поверхность, но процессы промывки и гидравлической перегрузки фильтрующего материала в них затруднены из-за неравномерного гидравлического сопротивления загрузки.

**Фильтрующие материалы.** Материал, загружаемый в осветлительные фильтры, должен хорошо задерживать содержащиеся в осветляемой воде грубодисперсные вещества, легко отмываться от задержанной взвеси, не измельчаться и не истираться при промывке, быть стойким против химического воздействия фильтруемой воды и не загрязнять фильтруемую воду какими-либо веществами, входящими в состав самого материала. В качестве материалов, отвечающих этим требованиям, наиболее широкое применение получили кварцевый песок и дробленый антрацит.

Применять кварцевый песок в осветлительных фильтрах для подготовки добавочной питательной воды парогенераторов высокого давления нецелесообразно ввиду опасности загрязнения фильтрата кремниевой кислотой.

Важным показателем качества фильтрующего материала является его механическая прочность. При недостаточной механической прочности при взрыхляющей промывке происходит истирание и измельчение зёрен, в результате чего повышается гидравлическое сопротивление фильтрующей загрузки, происходит вынос измельчённых зёрен при промывке и безвозвратная потеря фильтрующего материала.

**Эксплуатация осветлительных фильтров.** Работа осветлительных фильтров состоит из трех периодов: полезной работы фильтра по осветлению воды, взрыхляющей промывки фильтра и спуска первого фильтрата в дренаж. Эксплуатация фильтра в межпромывочный период состоит в наблюдении за прозрачностью воды после пропуска её через фильтр, производительностью фильтра и изменением его гидравлического сопротивления (величиной потери напора). Для этого на линиях осветляемой и осветлённой воды установлены пробоотборные краны и манометры, а на линиях промывочной и осветлённой воды – расходомеры.

При снижении прозрачности осветлённой воды, а также при достижении максимально допустимой потери напора фильтр выводится из работы на промывку. Промывка фильтра заключается в пропуске через него осветленной воды снизу вверх. Для этого сначала фильтр выключается из работы, а затем подаётся вода из промывочного бака. Интенсивный поток промывочной воды, поднимаясь, разрыхляет и взвешивает весь фильтрующий слой, расширяющийся при этом на 40–50 %, что даёт возможность зернам загружённого фильтрующего материала свободно двигаться в потоке воды и при столкновениях счищать прилипшие к ним частицы шлама и слизи.

Скорость воды при взрыхляющей промывке характеризуется интенсивностью промывки, под которой подразумевается секундный расход воды в литрах через  $1 \text{ м}^2$  сечения фильтра  $[\text{л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})]$ . Промывка фильтра должна проводиться с такой интенсивностью, которая, обеспечивая вымывание осадков, не приводит к выносу зёрен фильтрующего материала. Величина интенсивности промывки зависит от рода материала, размера его зёрен, температуры промывочной воды и обычно составляет 15–18  $\text{л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  для кварцевого песка и 10–12  $\text{л}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$  для дробленого антрацита. Контроль за интенсивностью промывки осуществляется по расходу промывочной воды, измеряемому расходомером.



Первый, мутный фильтрат спускается в канализацию со скоростью 5 м/ч в течение 5–10 мин, после чего фильтр включается в нормальную работу. Во время работы фильтра постепенно заполняется осветлённой водой промывочный бак. Продолжительность остановки фильтра на промывку и спуск первого фильтрата со всеми переключениями задвижек составляет около 20 мин.

Скорость фильтрования воды в напорных осветлительных фильтрах, загруженных кварцевым песком или дроблёным антрацитом, при предварительной обработке воды в осветлителях составляет 5–6,5 м/ч, а без предварительной обработки её – 4–5 м/ч.

Удельная грязеёмкость фильтрующих материалов в однопоточных фильтрах без предварительной обработки воды перед фильтрами составляет для кварцевого песка  $0,75 \text{ кг/м}^2$ , для дроблёного антрацита –  $1,0 \text{ кг/м}^2$ , при предварительной обработке воды в осветлителе удельная грязеёмкость – 1,25 и  $1,5 \text{ кг/м}^2$ , соответственно. С точки зрения экономичности работы установки и удобства обслуживания фильтров продолжительность фильтроцикла должна быть не менее 8 ч, а количество установленных фильтров – не меньше трёх.

Для уменьшения расхода воды на собственные нужды и повышения эффективности промывки иногда применяются устройства для верхней промывки фильтров, которые представляют собой систему дырчатых труб, уложенных на 50–75 мм выше поверхности фильтрующего слоя. Подводимая в устройство промывочная вода, проходя через отверстия, размывает плёнку задержанной взвеси.

Эксплуатация осветлительных фильтров значительно облегчается применением автоматической системы управления их работой.

Скорость фильтрования обычно выдерживают в пределах 5–7 м/ч (по сечению фильтра), а в отдельных случаях до 10 м/ч. При повышении скорости фильтрования не образуется равномерная плёнка на поверхности фильтрующего материала, и осветление воды происходит только за счёт оседания загрязнений в толще загрузки. Эффективность загрузки при этом снижается.

## 5.5. Конструкция осветлителей

При обработке воды методами коагуляции и известкования выделяется твёрдая фаза в виде хлопьев, аморфных или кристаллических осадков, которая должна быть отделена от обрабатываемой воды.

В осветлитель подаётся подогретая до  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  исходная вода, прошедшая воздухоотделитель. Дозируемые растворы реагентов отдельно

вводятся в нижнюю часть осветлителя – камеру смешения – с помощью перпендикулярно расположенных сопел. Вращательное движение воды замедляется с помощью перфорированных вертикальных перегородок, а выравнивание вертикальной скорости подъёма производится горизонтальной решёткой. Выделяющаяся твёрдая фаза поддерживается водой во взвешенном состоянии, причём максимальный уровень осадка поддерживается на 1,5 м ниже верхнего сборного устройства, в результате чего образуется защитный слой осветленной воды. Основная часть воды, поднимаясь, проходит слой взвешенной фазы и защитную зону, освобождаясь при этом от взвеси, собирается в кольцевом желобе и выводится из осветлителя. Меньшая часть воды (10–15 %) из верхней части взвешенного слоя вместе с твёрдой фазой поступает через шламоприёмные окна в шламоуплотнитель, в котором из-за отсутствия восходящего движения шлам отстаивается, частично обезвоживается и удаляется по линии постоянной продувки. Освобождённая от осадка вода отводится от шламоуплотнителя и подаётся по трубопроводу в сборный желоб осветлителя. Для удаления скапливающегося песка и других грубодисперсных примесей в нижнюю часть осветлителя производят периодическую продувку. Осветлители со взвешенным слоем обладают по сравнению с осаждением взвеси из горизонтального потока воды в отстойниках следующими преимуществами: ускоряется процесс хлопьеобразования за счёт каталитического влияния ранее сформированной взвеси и интенсификации массообмена, улучшаются гидравлические условия отделения твёрдой фазы, снижается расход реагентов вследствие более полного использования адсорбционных свойств осадка.

При конструировании осветлителя необходимо решать две основные задачи, связанные с отсутствием выноса взвешенной фазы из осветлителя и получением минимального остаточного содержания первично образующихся хлопьев. Первая задача решается выбором скорости восходящего потока, которая не должна превышать скорость начала псевдооживления. Эта скорость определяет производительность осветлителей и является их основным расчётным параметром. Во взвешенном слое скорость стеснённого осаждения хлопьев меньше скорости свободного осаждения и зависит от объёмной концентрации взвеси. Для расчёта осветлителей экспериментально найдено соотношение между скоростями свободного (расчетного)  $W_{oc}$  и стеснённого (истинного)  $W_{ст}$  осаждения:

$$\frac{W_{oc}}{W_{ст}} = (1 - C_o)^n,$$

где  $C_0$  – объёмная концентрация взвеси, доли единицы;  $n$  – показатель степени, зависящий от числа Рейнольдса и формы частицы.

Стабильное положение уровня взвешенного слоя обеспечивается в широком диапазоне скоростей восходящего потока воды.

Для практических расчетов применительно к осветлителям используется уравнение Кургаева:

$$W_{ст} = W_{ос} \cdot (1 - 3,5 \cdot C_0),$$

при значениях  $C_0 = 0-0,15$ . По результатам расчётов уравнений и опытных данных работы осветлителей для коагуляции в водах с различным содержанием грубодисперсных примесей (ГДП) скорость восходящего движения воды принимается 0,7–1 мм/с. Образующийся в процессе известкования шлам характеризуется более высокой плотностью, что определяет возможность поддержания более высоких скоростей восходящего движения воды в зоне осветления в пределах 1–1,5 мм/с. Предел изменения скоростей связан с различными свойствами осадков  $CaCO_3$  и  $Mg(OH)_2$ . Хлопья  $Mg(OH)_2$  получаются более лёгкими и рыхлыми, хотя и более крупными, поэтому скорость подъёма воды в осветлителе выбирают в зависимости от доли магниевой жесткости по отношению к общей жесткости и от степени выделения в твёрдую фазу ионов  $Mg^{2+}$  при известковании. Различные гидравлические характеристики осветлителей для коагуляции и известкования требуют различных типов осветлителей. Например, осветлители для коагуляции и известкования одинаковой производительности (100 м<sup>3</sup>/ч) имеют диаметр в зоне осветления 7 и 5,5 м, общий объём 200 и 133 м<sup>3</sup>, массу металлоконструкций 22,6 и 13,55 т. Большую роль в процессах предочистки играет не только абсолютная температура, но и стабильность её поддержания, так как отклонение от заданной температуры на  $\pm 1$  °С приводит к образованию в осветлителе местных токов воды, вызывающих гидравлическую нестабильность и увеличение концентрации грубодисперсных примесей в обрабатываемой воде. Вторая задача – повышение степени очистки воды от первичных хлопьев во взвешенном слое – связана с выбором его оптимальной высоты и концентрации. Степень очистки  $K_c$  (критерий сепарации), по Кургаеву, зависит от высоты взвешенного слоя и концентрации взвеси в контактной среде осветлителя. Линейная зависимость между эффективностью очистки и высотой взвешенного слоя сохраняется до некоторого значения  $L$ , и дальнейшее увеличение высоты

практически не снижает остаточное содержание взвешенных веществ. Этот факт связан с выносом хлопьев из контактной среды. Из экспериментальных и эксплуатационных данных, характеризующих работу осветлителей, установлено, что высокие коэффициенты очистки и низкое содержание веществ в осветлённой воде менее  $10 \text{ мг/дм}^3$  могут быть получены при объёмной концентрации взвеси в контактной среде в пределах  $0,05\text{--}0,15 \text{ мг/дм}^3$  и высоте взвешенного слоя  $3\text{--}4 \text{ м}$ , что реализуется в современных осветлителях. Продувочная вода осветлителей, содержащая шлам в концентрации до  $10 \%$ , может отводиться на нейтрализацию кислых стоков (при рН выше 9) в систему гидрозолоудаления, на шламоотвал или в отстойники с повторным использованием осветленной воды, в устройства для обезвоживания шлама (фильтр-пресс). Коагуляция может осуществляться не только путем использования осветлителей, но и в прямоточной схеме с отделением воды от взвешенных в ней хлопьев непосредственно на осветлительных фильтрах. Ввод коагулянта в трубопровод обрабатываемой воды осуществляется перед разветвлением потока на фильтры на расстоянии  $50$  диаметров трубопровода. При содержании взвешенных частиц  $100 \text{ мг/дм}^3$  коагуляция по прямоточной схеме вызывает частичную промывку осветлительных фильтров, большие расходы на собственные нужды, т.е. становится затруднительной и нетехнологичной. Прямоточная коагуляция используется очень редко.

При промывке осветлительных фильтров проверяют горизонтальность установки верхнего и нижнего распределительных устройств, состояние накладных кожухов дренажных лучей нижнего распределительного устройства (НРУ), качество антикоррозионного покрытия внутренней поверхности, плотность крепления лучей к коллектору НРУ. Фильтрующий материал загружают через верхний люк фильтра гидроэлеватором. Для загрузки фильтров иногда используют материал неоднородного фракционного состава с преобладанием мелких фракций. В таких случаях загружают фильтры в  $2\text{--}3$  этапа с промежуточной отмывкой и удалением мелочи в каждом. Продолжительность отмывки зависит от её интенсивности и загруженности фильтрующего материала. Интенсивность промывки для кварца –  $12 \text{ (л/с}\cdot\text{м}^2)$ , для антрацита ( $9 \text{ л/с}\cdot\text{м}^2$ ), что соответствует скорости  $30\text{--}40 \text{ м/ч}$ . Работа осветлительных фильтров состоит из чередования двух циклов: промывки и собственно работы. На промывку фильтры выводятся по мере загрузки фильтрующего материала. Контролирующим показателем этого процесса является увеличение перепада давления на фильтре и снижение производительности.

Предельно допустимая производительность рабочего цикла определяется для конкретных условий в процессе наладки, обычно в пределах 24–48 ч. В двух- и трехкамерных фильтрах камеры работают параллельно. На металлические основания, разделяющие камеры, устанавливаются распределительные устройства и загружают материал. Для выравнивания давления в камерах используют анкерные трубы, с отверстиями в верхней части каждой камеры. Взрыхляющую промывку проводят отдельно для каждой камеры.

### 5.6. Современные осветлители

**Современные осветлители со взвешенным осадком.** Обработываемая вода, смешанная с реагентами, вводится в осветлитель снизу и равномерно распределяется по площади рабочих коридоров. 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. Отечественная практика эксплуатации осветлителей показала, что поддержание взвешенного слоя осадка на заданном уровне обеспечивает устойчивую работу аппарата только при наличии регулируемого непрерывного принудительного удаления избыточного осадка из взвешенного слоя в осадкоуплотнитель. Аппараты со взвешенным слоем классифицируют: по способу удаления частиц осадка – с естественным отбором и с принудительным отсосом; по рабочему давлению – на напорные и открытые; по расположению осадкоуплотнителей – с вертикальными, наддонными и выносными.

Наличие распределительных дырчатых днищ в осветлителях приводит к нарушению нормальной работы аппаратов из-за завала осадком части площади дырчатых днищ. При осветлении маломутных цветных вод осветлитель с дырчатым дном типа ВНИИГС-2 работает устойчиво без завала дырчатых днищ осадком. Во взвешенный осадок осветлителя вводят гравийную пригрузку. Это позволяет улучшить процесс формирования взвеси, увеличить производительность на 20 %, сократить расход коагулянта на 20 %. В вертикальный осадкоуплотнитель вводят специальную контактную массу из зерен кварцевого песка или дробленого керамзита. Во время работы зерна взвешенной контактной массы являются центрами коагуляции. Существуют ярусные осветлители, напорные осветлители с выносным осадкоуплотнителем. Избыток осадка из взвешенного слоя удаляется принудительным отсосом через воронку.

Интересен осветлитель конструкции Курчаева: это осветлитель большой производительности ЦНИИ-3 для осветления мутных вод. В России внедрены такие осветлители производительностью до  $9000 \text{ м}^3/\text{сут}$  с диаметром в верхней части 11 м и общей высотой около 9 м.

За рубежом осветление воды с использованием взвешенного осадка в основном применяют в конструкциях осветлителей двух типов – в пресипитаторах и акселераторах. Характерной особенностью большинства зарубежных осветлителей со слоем взвешенного осадка является наличие встроенного вентилятора (механической камеры реакции). Ввод реагентов производится непосредственно в зону первичного хлопьеобразования, где происходит рециркуляция осадка. В осветлителе отсутствует принудительный отсос избытка шлама. В некоторых конструкциях осветлителей в США обрабатываемая вода по их сечению распределяется вращающейся перфорированной трубчатой системой или соплами, приводящими её во вращательное движение. Сущность работы суперпульсатора заключается в пульсирующей подаче осветленной воды (с помощью вакуумной камеры) под слой взвешенного осадка, что препятствует осаждению его на дно и образованию завалов. Взвешенный слой совершает возвратно-поступательное движение и может увеличиваться в объёме за счёт примесей обрабатываемой воды и флокулянтов. Отличительной особенностью аппарата является размещение в слое взвешенного осадка под углом  $60^\circ$  тонкослойных модулей с отражателями на нижней стороне каждой полки, что способствует формированию медленного вихревого движения воды. Благодаря этому в «суперпульсаторе» сочетаются преимущества обработки воды в слое взвешенного осадка и его пульсация, обеспечивающая более интенсивное коагулирование воды и осаждение в тонком слое. Полки с отражателями, расположенные перпендикулярно илосборнику, дают возможность поддерживать вдвое большую концентрацию осадка во взвешенном слое при тех же скоростях восходящего потока, что и обычно. Это обеспечивает стабильный эффект обработки воды при восходящей скорости от 3–4 мм/с. Верхняя граница взвешенного слоя ограничена переливом в илосборник, где не действуют силы, вызывающие движение воды вверх, и где происходит осаждение осадка. Сбор и удаление осветленной воды осуществляется системой перфорированных труб, примыкающих к торцовому сборному лотку. Большинство зарубежных конструкций осветлителей характеризуются большими площадями аппаратов в плане (до  $1000 \text{ м}^2$  и более), отсутствием устройств для принудительного отсоса осадка из взвешенного слоя

в осадкоуплотнитель, сложностью конструктивного оформления, определенными эксплуатационными трудностями. Современные отечественные конструкции осветлителей значительно проще и надёжнее по своему устройству и эксплуатации, а поэтому экономичнее при строительстве. Устройство системы принудительного отсоса осадка в отечественных конструкциях осветлителей обеспечивает их стабильную работу, а простая и рациональная конструкция аппаратов позволяет получить высокий эффект осветления воды при минимальных эксплуатационных затратах.

### 5.7. Расчет и проектирование осветлителей

Расчет и проектирование осветлителей производят с учётом годовых колебаний качества обрабатываемой воды, ориентируясь на два характерных периода: минимальной мутности при минимальном значении зимнего расхода воды и наибольшей мутности при наибольшем, ей соответствующем, летнем расходе воды. Основными расчётными параметрами осветлителей являются скорость восходящего движения воды в зоне осветления  $v$ , определяемая по результатам технологических исследований, и коэффициент распределения воды между зоной осветления и зоной отделения осадка  $k$ . При отсутствии данных эксперимента эти величины определяют по таблицам. Зная расчётный расход воды  $q$ , м<sup>3</sup>/ч, площадь зоны осветления воды вычисляют по формуле:

$$A_{\text{ос}} = \frac{q \cdot k}{3,6 \cdot v},$$

а площадь зоны отделения и уплотнения осадка – исходя из выражения:

$$A_{\text{ос}} = \frac{q \cdot (1 - k)}{3,6 \cdot v}.$$

При размещении в зонах осветления, отделения и уплотнения осадка тонкослойных модулей площадь зоны осветления определяют по удельным нагрузкам, отнесенным к площади зеркала воды, занятой тонкослойными блоками: для мутных вод – 4,6–5,5, для вод средней мутности – 3,6–4,5, для маломутных и цветных вод, обработанных коагулянтном – 3–3,5 м<sup>3</sup>/(ч·м<sup>2</sup>). Высоту слоя взвешенного осадка назначают 2–2,5 м, потерю напора в нём определяют из расчета 1–2 см на 1 м его

высоты, а высоту зоны осветления назначают 2–2,5 м. Угол между наклонными стенками нижней части зоны взвешенного осадка принимают 60–70 градусов. Нижнюю часть осадкоприёмных окон или кромку осадкоотводящих труб располагают на 1–1,5 м выше перехода наклонных стенок зоны взвешенного осадка в вертикальные. Высота стенок должна на 0,3 м превышать расчётный уровень воды. Расстояние между сборными желобами с треугольными водосливами или перфорированными трубами в зоне осветления принимают не более 3 м. В окнах крупных осветлителей диаметром до 4 м устраивают только периферийный желоб, а при большем диаметре добавляют радиальные: при диаметре аппарата 4–6 м – 4–6 радиальных желобов, а при диаметре 6–10 м – 6–8 желобов. Распределение воды по площади осветлителя производят перфорированными трубами, размещёнными на расстоянии не более 3 м в осях, и рассчитывают по скорости выхода воды 1,5–2 м/с, а расстояние между отверстиями, располагаемыми вниз под углом 45 градусов по обе стороны трубы в шахматном порядке, принимают не более 0,5 м.

Объём зоны накопления и уплотнения осадка находят по формуле:

$$V_{\text{зн}} = \frac{q \cdot T \cdot (C_{\text{и}} - \mu_0)}{\gamma \cdot N},$$

где  $T$  – период работы между сбросами осадка, г;  $\mu_0 = 8\text{--}15 \text{ г/м}^3$  – мутность воды, выходящей из отстойника;  $\gamma$  – средняя по высоте осадочной части концентрация твёрдой фазы осадка,  $\text{г/м}^3$ , зависящая от мутности исходной воды и продолжительности периода между сбросами, принимается по СНиПу;  $N$  – количество рабочих отстойников,  $C_{\text{и}}$  – концентрация взвешенных веществ в воде, поступающих в отстойник:

$$C_{\text{и}} = M + K_K \cdot D_K + 0,25Ц + B_{\text{и}},$$

где  $M$  – мутность,  $K_K$  – коэффициент принимаемый для очищенного сульфата алюминия, равен 0,5,  $D_K$  – доза коагулянта по безводному продукту,  $\text{г/м}^3$ ,  $Ц$  – цветность исходной воды, град,  $B_{\text{и}}$  – количество нерастворимых примесей, вводимых с известью  $\text{г/м}^3$ , определяемые по формуле:

$$B_{\text{и}} = D_{\text{и}}/K_{\text{и}} - D_{\text{и}},$$

где  $K_{\text{и}}$  – доленое содержание CaO в извести,  $D_{\text{и}}$  – доза извести по CaO,  $\text{г/м}^3$ .



## **5.8. Наладка и эксплуатация установок предварительной очистки воды**

Осветлители, как правило, размещают вне здания ВПУ, на минимальном расстоянии от неё. Для удобства обслуживания конусная часть осветлителя имеет закрытое движение. Над верхней цилиндрической частью с утепленным переходом в основное здание ВПУ сооружается шатёр. Для расчёта осветлителей, складов реагентов и аппаратов реагентного хозяйства принимают номинальную потребность в обработанной воде и максимальные дозы реагентов, отвечающие качеству исходной воды в паводковый зимний период. В проекте предочистки должны предусматриваться автоматизация поддержания заданной температуры подогрева воды, управление подачи реагентов, продувки осветлителей (по сигналу СУШ), дистанционного измерения «отсечки» и управления ею, управление подачи воды на каждый осветлитель.

Основные контрольно-измерительные приборы: рН-метры исходной воды, регистраторы температуры и расхода воды, указатели размера «отсечки» и продувки мутности. Объём наладочных работ должен включать: проверку законченности и правильности монтажа оборудования схемы, контроль загрузки осветлительных фильтров, наладку контрольно-измерительных приборов и систем автоматизации, определение в лабораторных условиях дозы извести, коагулянта и флокулянта, определение оптимальных условий формирования контактной среды осветлителя, уточнение режима промывки осветлительных фильтров, уточнение объёма технологического контроля.

Пуск и наладка предочистки должны проводиться после полного завершения монтажа технологической, контрольно-измерительной и регулирующей аппаратуры, а также систем автоматики и их предварительного опробования.

Определение оптимальных условий формирования контактной среды осветления включает уточнение режима промывки осветлительных фильтров; уточнение объёма технологического контроля: составление технологических карт и рабочей инструкции по эксплуатации предочистки. При монтаже осветлителей соблюдаются проектные размеры всех элементов, которые должны быть установлены вертикально с отклонением в допустимых пределах. Корпус осветления содержит: воздухоотделитель и шламоуплотнитель оси воронок распределительных труб сырой воды в воздухоотделителе, шламоприёмные трубы,

стенки сборного желоба, перегородки с калиброванными отверстиями в распределительном устройстве. Горизонтально должны быть установлены в допустимых пределах: борт осветлителя и воздухоотделителя, верхняя распределительная решетка, борт и дно сборного желоба, сборный коллектор осветленной воды в шламоуплотнителе, верхние и нижние кромки шламоприемных окон. Горизонтальность проверяется по гидроуровню, и окончательная выверка производится по уровню воды. Воздухоотделитель, шламоуплотнитель, сборный желоб, распределительные устройства, все трубопроводы и осветлитель должны быть проверены по плотности воды. В процессе эксплуатации контролируются: температура исходной нагрузки осветлителей, заданные дозы реагентов, значение «откачки», работа насосов дозаторов, гидравлическая характеристика шлама, объём и периодичность химического контроля. Перед включением осветлителя в работу приготавливают рабочие растворы реагентов и проверяют работу насосов-дозаторов, включают механическое перемешивание или рециркуляцию известкового молока в рабочей мешалке.

В работу осветлитель включают в следующем порядке: подают воду; устанавливают по расходомеру нагрузку на осветлитель, равную 0,5–0,7 номинальной; через 5–7 минут после начала подачи воды на осветлитель открывают на 5–10 минут дренаж для промывки нижней части конуса осветлителя; заполнение осветлителя и шламоотделителя идёт одновременно; открывают вентили на всех приборных точках; при появлении воды из пробоотборной точки зоны течения включают подачу реагентов и устанавливают реагентную дозу; по достижении уровня воды нижнего окна шламоуплотнителя ведут контроль за качеством воды в осветлителе в точке на этом уровне. При гидратной щелочности в этой точке, равной 0,05–0,4 мг-экв/кг, закрывают периодическую продувку шламоуплотнителя и открывают непрерывную его продувку: по мере заполнения осветлителя открывают выход в бак осветленной воды. Грязевик осветлителя в первые сутки работы продувают при полной открытой задвижке в течение 1–2 мин. В период пуска осветлителя доза коагулянта должна быть на 70 % больше оптимальной, а через сутки после подачи исходной воды дозу коагулянта снижают до оптимального значения, полученного в лабораторных условиях. При работе осветлителя осуществляют технологический и химический контроль за его режимом. Технологический контроль предусматривает приготовление рабочих растворов реагентов заданной концентрации, поддержание нормальной температуры, подогрев обрабатываемой воды до 30 или 40 °С

с колебаниями  $\pm 1$  °С; поддержание режима стабильной нагрузки осветлителя (допустимы изменения нагрузки не более чем на 10 % в течение 10–15 мин); строгое поддержание установленных дозировок реагентов; поддержание верхней границы шламового фильтра на уровне шламоприемных окон в переходной зоне. Для визуальной оценки качества шлама при номинальной нагрузке осветлителя отбирают пробы из всех проотборных точек через каждые 2 ч и измеряют высоту столба шлама после 40 мин отстоя. Пробы отбирают в цилиндры диаметром 40–60 мм, высотой 250 мм. Номинальная характеристика: шлам должен обладать творожистой структурой и быть однородным; не должно наблюдаться расслоения осадка при стоянии, осаждение осадка должно происходить всей массой одновременно; в слое воды шлам не должен оставаться в большом количестве взвешенных неосевших мелких частиц. Высоту шламового фильтра регулируют автоматически или вручную изменением размера отсечки и непрерывной продувки. Для снижения уровня шламового фильтра увеличивают непрерывную продувку, «отсечку» при этом открывают полностью. Для повышения уровня шлама непрерывную продувку уменьшают или закрывают полностью до появления шлама в шламоприёмных окнах. В процессе работы осветлителя происходит накопление шлама на верхней решётке. Его периодически смывают в осветлитель. Перед смывом прекращают подачу воды, открывают продувку шламоуплотнителя и при снижении уровня воды на 15–20 см ниже распределительной решётки начинают смыв.

### 5.9. Схемы реагентного хозяйства

Известковое реагентное хозяйство включает устройства для разгрузки извести с железнодорожного транспорта, склад для хранения сухой извести или известкового теста, ёмкости приготовления и хранения известкового молока рабочей концентрации, насосы-дозаторы и устройства для удаления недопала. Известь может храниться как в сухом виде, так и в виде известкового теста. Выбор способа хранения извести определяют технико-экономическим сравнением, учитывающим как первоначальные затраты на сооружение складов, так и эксплуатационные расходы на их обслуживание. Хранение извести в сухом виде обычно целесообразнее для электростанций с ВПУ производительностью более 500 т/ч.

Разгрузка извести, её внутрискладской транспорт, а также удаление пены и недопала должны быть механизированы. Помещения склада должны быть оборудованы приточно-вытяжной вентиляцией, обеспечивающей санитарно-гигиенические условия работы персонала. В схемах сухого хранения извести предусматриваются её дробление перед загрузкой в бункера-хранилища, дробление недопала после аппарата МИКА, гашение извести в механических гасителях, механизированное удаление отходов гашения. В схемах мокрого хранения извести должны быть предусмотрены дробление и механизированное удаление отходов гашения. Известковое молоко очищается от песка и незагасившихся частиц в напорных или открытого типа гидроциклонах. Открытые гидроциклоны устанавливаются на сливе известкового молока из гасителей, а напорные – на трубопроводе заполнения затворных мешалок известкового молока. Для приготовления известкового молока заданной рабочей концентрации в дополнение к затворным мешалкам устанавливаются расходные мешалки с механическими смесителями. Перемешивание известкового молока в расходной мешалке сжатым воздухом недопустимо, так как при этом будут нарушаться работа насосов-дозаторов и режим дозирования. При номинальной нагрузке осветлителя полезный объём расходной мешалки рассчитывается не менее чем на 12-часовой расход известкового молока. Дозируется известковое молоко, так же как и другие реагенты, насосами-дозаторами серии НД. Для ввода каждого реагента в каждый осветлитель устанавливаются по два насоса-дозатора (рабочий и резервный). Автоматизация процесса дозирования обеспечивается системой автоматического импульсного управления по расходу обрабатываемой воды. При этом подача реагента пропорциональна расходу обрабатываемой воды. Для дозаторов известкового молока длительность перерыва между включением двигателя не более 90 с, для дозаторов коагулянта – 40 с.

Коагулянтное хозяйство состоит из устройств разгрузки реагента с железнодорожного транспорта, склада сухого или мокрого хранения, ячейки или мешалки для хранения раствора реагента нужной концентрации, мешалки рабочего раствора реагента и дозирующих устройств. Хранение коагулянта преимущественно ведётся в ячейках, в виде раствора, для его перемешивания в ячейки подводится сжатый воздух. Раствор заданной концентрации готовят и хранят в расходных баках. Полезная ёмкость их рассчитывается не менее чем на суточный расход при минимальной дозе и номинальной нагрузке осветлителя.

Дозирование раствора коагулянта осуществляется насосами-дозаторами. Расходные баки снабжают заборными трубками и фильтро-сеткой на всасывающей линии насоса-дозатора. Перед подачей в гидромешалки раствор коагулянта подвергается очистке в напорных фильтрах. В качестве фильтрующего материала в них используется кварц, антрацит или полукокс.

### **Контрольные вопросы к главе 5**

1. Назовите скорость фильтрования, которую принимают при выборе числа и размеров механических фильтров.
2. Перечислите показатели, которые влияют на время работы механического фильтра.
3. Перечислите требования, которые предъявляются к загрузочному материалу механических фильтров.
4. Перечислите показатели качества воды, которые снижаются при коагуляции.
5. Перечислите показатели качества воды, которые снижаются при известковании.
6. Как называют частицу дисперсной фазы вместе с ДЭС для коллоидных растворов?
7. Как осуществляется регенерация осветлительных (механических) фильтров?
8. Перечислите примеси, удаляемые на механических фильтрах.
9. Проведите классификацию осветлительных фильтров.
10. Как определяется число установленных механических фильтров на ВПУ?
11. Какова скорость фильтрования в механических фильтрах?
12. Назовите технологические характеристики механических фильтров.
13. Что такое фильтроцикл осветлительных фильтров?
14. Что называется грязеемкостью?
15. Как изменяется рН обрабатываемой воды при известковании?
16. Что такое жесткость?
17. Перечислите виды жесткости воды.
18. Напишите формулу расчета дозы известки.

## ГЛАВА 6. ИОНИТНОЕ ХИМИЧЕСКОЕ ОБЕССОЛИВАНИЕ

### 6.1. Иониты. Свойства и характеристики

На электростанции предварительную очистку воды применяют для подготовки добавочной воды котлов высокого и сверхвысокого давления перед химическим обессоливанием, котлов среднего давления и испарителей перед Na-катионированием. Предварительная очистка воды, состоящая в удалении коллоидных примесей, необходима для увеличения надёжности и экономичности работы ионитной части ВПУ. Присутствие загрязнений приводит к преждевременному старению анионитов, что сопровождается уменьшением глубины очистки и увеличением расхода реагентов на регенерацию анионита. Уменьшается карбонатная жесткость, удаляются органические и железистые соединения.

Высокая степень обессоливания природных вод достигается с применением ионитов, т.е. нерастворимых высокомолекулярных веществ, которые благодаря наличию в них ионогенных групп способны к реакциям ионного обмена. Ионообменными свойствами обладают иониты на основе синтетических смол. Они состоят из «пространственно сшитых» углеводородных цепей (матрицы) с жестко закреплёнными на них активными ионогенными группами. Матрицы полимера с фиксированными отрицательными ионами представляют собой полианион, с положительными – поликатион. В качестве исходных мономеров используют в основном стирол и дивинилбензол.

Природа фиксирующих групп или ионов оказывает решающее влияние на ионообменные свойства смолы. В качестве фиксирующих групп (ионов) могут служить:

- для катионитов  $-\text{SO}_3^{2-}$ ,  $-\text{COO}^-$ ,  $-\text{PO}_3^{2-}$
- для анионитов  $-\text{NH}_3^+$ ,  $=\text{NH}_2^+$ ,  $\equiv\text{S}^+$ ,  $\equiv\text{N}^+$  и др.

Иониты обладают способностью удерживать на своей поверхности различные ионы и при известных условиях обменивать их на другие, находящиеся в растворе, контактирующем с ионитами. Иониты, способные к обмену катионов, – катиониты, к обмену анионов, – аниониты. Иониты – особый класс электролитов, обладающих рядом общих технологических признаков: нерастворимость, способность к диссоциации на ионы, гидролизу, образованию ионной атмосферы:

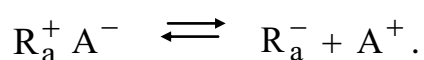
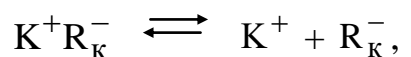


Таблица 6.1

## Технологические характеристики ионитов

Ионит	Страна изготовитель	Крупность зерен, мм	Насыпная плотность, г/м <sup>3</sup>		Коэффициент набухания	Полная обменная емкость, г-экв/м <sup>3</sup>	Допустимая температура, °С
			Воздушно-сухого	Влажного			
Катиониты							
Сульфуголь СМ-1	Россия	0,3–0,8	0,65	0,55	1,20	570	60
Сульфуголь СК-1	Россия	0,5–1,1	0,65	0,55	1,20	500	60
КУ-2	Россия	0,4–1,25	0,71	0,50	1,42	1300	120
КУ-2-8чс	Россия	0,4–1,25	0,73	0,50	1,46	1300	120
КБ-4-10П	Россия	0,3–1,6	0,75	–	–	2800	120
Вофатит KPS	Германия	0,3–1,2	0,70	0,48	–	1700	115
Амберлит JR-120	США	0,45–0,6	–	–	–	1700	120
Зеролит 225	Англия	0,3–1,2	0,79	–	–	1600	140
Леватит S100	Германия	0,3–1,0	0,78	–	–	1900	120
Аниониты							
АН-31	Россия	0,4–2,0	0,68	0,49	–	1200	–
АВ-17	Россия	0,35–1,25	0,74	0,39	1,9	690	60
АВ-17-8чс	Россия	0,4–1,25	0,74	0,39	1,9	930	60
Вофатит SBW	Германия	0,3–1,2	–	–	–	800	60
Амберлит JRA-400	США	0,38–0,45	0,71	0,45	1,58	810	50
Варион АТ-660	ВНР	0,3–1,1	–	–	–	830	60
Зеролит FF	Англия	0,3–1,2	0,69	–	–	900	60
Леватит М600	Германия	0,3–1,2	0,73	0,45	1,62	870	40

К технологическим характеристикам ионитов относятся их фракционный состав, насыпной вес, способность к набуханию, механическая прочность, обменная ёмкость (табл. 6.1).

В зависимости от свойств функциональных групп бывают катиониты сильнокислотные (содержащие только функциональные группы  $-\text{SO}_3\text{H}$ ), слабокислотные или карбоксильные (функциональные группы  $\text{COOH}$ ). Промежуточное положение занимают катиониты, содержащие функциональные группы разной природы ( $\text{SO}_3\text{H}$ ,  $\text{COOH}$  и  $\text{OH}$ ).

### ***6.1.1. Гранулометрический состав ионитов***

Процесс ионного обмена приближенно можно представить в виде составляющих:

- 1) перенос ионов раствора к поверхности гранулы ионита;
- 2) диффузия ионов внутри гранулы;
- 3) протекание реакции ионного обмена;
- 4) диффузия вытесняемого из гранулы противоиона изнутри к поверхности гранулы;
- 5) перенос противоиона от поверхности гранулы ионита в объем раствора.

Общая скорость всего ионообменного процесса определяется наиболее медленной из последовательных стадий, обычно – диффузией ионов внутри зерна.

Существует оптимальное соотношение среднего размера гранул и толщины слоя для различного применения. Уменьшение размера зерна-гранулы ионита (в пределе – до порошкообразного состояния, размер частиц – 0,04–0,07 мм) приводит к увеличению гидравлического сопротивления до неприемлемых значений. Например, намывные фильтры формируются из порошкообразного ионита; толщина слоя должна быть ограничена 3–10 мм.

При большой площади поперечного сечения фильтрующего слоя не удастся обеспечить равномерное распределение потока по всей его площади, и часть ионита используется недостаточно. Уменьшение площади фильтрования вынуждает – для сохранения необходимого объема ионита увеличивать толщину фильтрующего слоя с неизбежным ростом гидравлического сопротивления фильтра.

Таким образом, существует технологически и экономически оптимальный гранулометрический состав ионитов:

– 0,3–1,3 мм – гранулы полимеризационных ионитов со средним размером 0,5–0,6 мм,



– 0,4–2,0 мм – гранулы поликонденсационных ионитов со средним размером 0,7–0,8 мм.

Большое значение имеет высокая однородность гранул, особенно в технологии ионирования с противоположными по направлению потоками обрабатываемой воды и регенерирующего раствора.

В настоящее время часть ионитов производится моносферными, то есть основная (не менее 90 %) масса гранул имеет отклонения от диаметра не более  $\pm 0,05$  мм [30].

Гранулометрический состав ионитов подобно другим зернистым фильтрующим материалам характеризуется следующими параметрами.

Эффективный диаметр зерен  $d_{эфф} = d_{10}$ , мм, равен калибру сита, через которое проходит 10 % ионита при его исследовании.

Эквивалентный диаметр зерен  $d_{экв}$ , мм, определяют по формуле:

$$d_{экв} = 100 \sqrt{\sum P_i d_i},$$

где  $P_i$  – количество зерен определенной фракции, оставшихся на сите калибром  $d_i$  % общего количества;  $d_i$  – калибр сита, т.е. размер отверстия в сите, мм.

Средний размер зерен  $d_{ср}$ , мм – это размер зерен более крупных, чем 50 % всех зерен ионита.

Коэффициент неоднородности:

$$k_H = d_{80} / d_{10},$$

где  $d_{80}$ ,  $d_{10}$  – диаметр зерен, мм, соответствующий калибру сита, через которое просеивается, соответственно, 80 и 10 % ионита.

Упомянутые показатели, используемые для характеристики гранулометрического состава ионитов, связаны формулой:

$$d_{ср} = 0,9 \cdot k_H \cdot d_{10}.$$

Здесь под зерном понимается и гранула гранульного ионита, и зерно дробленого ионита.

При гранулометрическом анализе зернистых ионитов производят рассев 200 г ионита на наборе предварительно калиброванных сит с отверстиями, размеры которых могут отличаться у разных производителей ионитов. Набор, применяющийся чаще всего: 0,25; 0,5; 0,6; 0,75; 1,0; 1,25; 1,50; 1,75; 2,0 мм.

Гранулометрический состав моноферных ионитов определяется не традиционным рассевом, описанным выше, а по специальной технологии, позволяющей сразу получить гранулы необходимого размера (не менее 90–92 % общего количества).

### **6.1.2. Насыпная масса и насыпной объем**

Насыпная масса для катионита –  $0,5–0,9 \text{ т/м}^3$ , анионитов –  $0,3–0,8 \text{ т/м}^3$ . Насыпной объем – величина, обратная насыпной массе,  $\text{м}^3/\text{г}$ . Различают значения насыпной массы в сухом (воздушно-сухом) и влажном состояниях.

Полное высушивание ионита разрушает его химическую структуру, поэтому характеристики ионита определяют для ионита в воздушно-сухом состоянии – при высушивании на воздухе, когда в зернах остается 5–10 % (массовых) воды.

Насыпная масса во влажном состоянии – это масса воздушно-сухого ионита в единице объема влажного (набухшего) ионита.

Знание значения насыпной массы ионита в воздушно-сухом состоянии необходимо для определения размеров склада хранения ионитов. Значение насыпной массы набухшего ионита определяет размеры и количество ионитных фильтров. Влажность (в процентах массы ионита) имеет значение при расчетах за приобретаемый ионит, так как цена ионита устанавливается с учетом определенной нормируемой влажности.

### **6.1.3. Механическая прочность**

Механическая прочность зерен ионитов характеризуется двумя понятиями: прочность на истирание и прочность на раздавливание.

Невозможно избежать соударения и «потирания» зерен между собой и о стенки фильтров во время рабочего и регенерационного процессов. Мерой прочности ионита на истирание служат данные об изменении фракционного состава ионитной загрузки после эксплуатации в конкретных условиях, в частности, сведения о количестве материала, прошедшего через сито с калибром (размером отверстий) 0,25 мм. Для гранулированных ионитов (гранулятов) считается хорошим показателем: истираемость – 2–3 % (лучшие сорта ионитов – 0,5 %).

Прочность на раздавливание в рабочих условиях фильтрования проявляется при наложении давления на зёрна от потока воды. Этот показатель имеет лишь умозрительное значение, так как в реальных условиях фильтрования давление воды не превышает 0,6 МПа (пробное давление – 0,9 МПа). Для сравнения: зерно не раздавливается даже при 1,0 МПа (если наступить на зерно – для него не будет никаких последствий).

#### **6.1.4. Осмотическая прочность**

Действие осмотических сил проявляется при изменении степени набухания ионитов. При увеличении степени набухания зерен их размер увеличивается, при уменьшении набухания – зерно уменьшается. Попеременное растягивание и сжатие структуры зерна сопровождаются разрывами цепей матрицы в местах наибольших напряжений. Микроскопические разрывы постепенно превращаются в трещины, а затем приводят к растрескиванию зерен, образованию осколков. Проверяют иониты на осмотическую прочность, подвергая зёрна (гранулы) 150 циклам обработки растворами кислоты и щелочи с промежуточной отмывкой дистиллированной водой.

Иониты гелевой структуры по осмотической прочности хуже макропористых ионитов, осмотическая прочность которых увеличивается с ростом количества «сшивок» (уменьшается набухаемость).

Полностью предотвратить воздействие осмотических сил на зерно ионита нельзя. Но нужно избегать условий, когда зерно особенно испытывает действие осмотических сил. Так, не следует допускать высыхание ионитов, поставляющихся изготовителями во влажном (набухшем) состоянии. Воздушно-сухие иониты во избежание быстрого набухания (осмотический удар) нужно сначала замачивать не в воде, а в концентрированном (20–25 %) растворе хлорида натрия, при этом концентрация соли будет соизмерима с концентрацией функциональных групп ионита.

#### **6.1.5. Химическая стойкость**

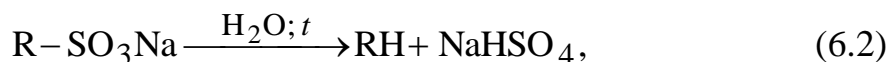
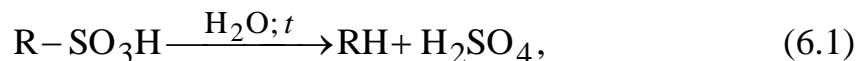
Химическая стойкость ионитов оценивается по их растворимости в воде и водных растворах реагентов. В кислотных и щелочных регенерационных растворах органические иониты обладают удовлетворительной стойкостью.

Окислители – кислород, хлор, озон, перекись водорода – разрушительно действуют на иониты, причем железо и другие тяжелые металлы служат в этих окислительных процессах катализаторами. В результате окисления ослабляются связи между группами в матрице, и возникают разрывы сетки полимера ионита. По мере уменьшения степени сшивки ионит становится мягче и может превратиться в гель. Оптимальная степень сшивки осуществляется с концентрацией дивинилбензола 8 %.

Применение для умягчения и деминерализации воды природных неорганических материалов, обладающих малой ионообменной способностью, имеет больше исторический интерес. Именно потому, что они (цеолиты, глаукониты) легко разлагаются в регенерационных растворах.

### 6.1.6. Термическая стойкость

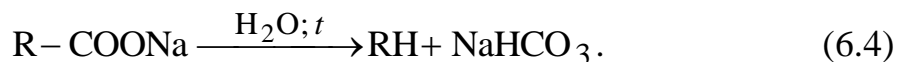
В водных растворах термическому разрушению подвергаются полярные связи функционально активных групп. У сульфокатионитов происходит отщепление сульфогрупп:



где R – условное обозначение не участвующего в ионном обмене каркаса ионита.

Из уравнений (6.1) и (6.2) следует, если катионит находится в водородной форме, то под действием повышенной температуры воды в среду, окружающую зерно, поступает серная кислота или гидросульфат натрия.

Когда катионит карбоксильный, происходит отщепление карбоксильных групп:



Сильноосновные аниониты также могут термически разлагаться с образованием низко- и высокомолекулярных спиртов и третичных аминов.

Как для катионитов, так и для анионитов отщепление функционально активных групп, выполняющих роль фиксированных в матрице ионов, означает постепенную потерю ионообменных свойств. Так, в процессе деградации анионитов происходит снижение основности ионита: монофункциональный сильноосновный анионит становится полифункциональным среднеосновным, затем – слабоосновным. Поэтому в технических условиях на поставку ионитов всегда указывается верхний предел допустимой температуры.

В фильтрах с намывным порошкообразным ионитом, каждая порция которого используется однократно (не регенерируется и срок его эксплуатации непродолжительный – тонкий слой ионита), допускаются повышенные температуры.

Катиониты, как правило, более термостойки, чем аниониты, а солевые формы ионитов более стойки, чем их водородные и гидроксильные формы (разность температур начала разложения доходит до 50 °С).

Для большинства сульфокатионитов допустимые температуры (в насыпных фильтрах) – 80–90 °С, у некоторых температура до 120 °С, для анионитов – 35–50 °С; в намывных фильтрах с сульфокатионитами – 120–130 °С, анионитами – 100–110 °С.

### **6.1.7. Ионообменные свойства**

В технических условиях и паспортах ионитов часто указываются разные показатели ионообменных свойств ионитов, что затрудняет выбор ионитов, их сопоставление.

Обменная емкость ионитов может быть представлена такими показателями как полная, рабочая, статическая (равновесная), динамическая.

Полная (общая) обменная емкость (ПОЕ) – общее количество ионообменных групп в единице объема влажного ионита или массы сухого ионита. ПОЕ не зависит от концентрации и природы обменивающихся ионов, постоянна для данного ионита, но изменяется под термическим, химическим и ионизирующим воздействием. Эта величина имеет, скорее, теоретическое значение. ПОЕ «сухих» катионитов около 5,0 ммоль/г.

Рабочая обменная емкость (РОЕ) – основная технологическая характеристика ионита, емкость, восстанавливаемая в процессе регенерации. Эту величину можно измерять до проскока сорбируемого иона в фильтрат. Обычно  $РОЕ = РОЕ_{пр}$ .

ПОЕ учитывается для нового («свежего») ионита, РОЕ – для отрегенированного.

Определить  $РОЕ_{пр}$  в лабораторных условиях или предварительно расчетом при проектировании можно лишь приблизительно. Точные значения устанавливают в конкретных условиях реального объекта.

Рабочая обменная емкость зависит от:

- природы ионита;
- его гранулометрической характеристики;
- качества исходной воды, причем зависимость определяется не только общим количеством улавливаемых ионов, но и их соотношением друг с другом, наличием в исходной воде железа, марганца, органических примесей;
- значения рН исходной воды, ее температуры и температуры регенерационного раствора;

- природы регенеранта, его чистоты, концентрации, удельного расхода;
  - требуемых показателей качества получаемой после фильтрования через ионит воды;
  - высоты слоя ионита;
  - скорости рабочего, регенерационного и взрыхляющего фильтрования;
  - удельного расхода отмывочной воды; площади фильтрования (площади горизонтального сечения фильтра);
  - применяемых интенсификаторов ионного обмена, если они применяются: магнитная обработка исходной воды и раствора регенеранта, добавление к регенерационному раствору комплексообразователей и др.
- Поэтому указываемые в технических условиях значения обменной емкости нужно проверять в лаборатории или пробной эксплуатацией.

Изготовители ионитов предусматривают экономически оптимальные расходы регенерантов, имея в виду, что рабочая обменная емкость должна достигать хотя бы 50–60 % от полной обменной емкости.

Обменная емкость измеряется в молях ионов, обмениваемых в  $1 \text{ м}^3$  ионита в его влажном (набухшем) состоянии: моль/ $\text{м}^3$  или ммоль/л. Так, например, если обменная емкость ионита равна  $800 \text{ моль}/\text{м}^3$ , это означает:  $1 \text{ м}^3$  такого ионита может извлечь 800 моль ионов. Иногда обменную емкость выражают в молях ионов на 1 кг воздушно-сухого ионита – моль/ $\text{дм}^3$ .

### **6.1.8. Селективность**

Одно из важных свойств ионитов – селективность, т.е. способность избирательно сорбировать из растворов некоторые ионы или группы ионов. Селективность ионитов определяется типом ионогенных групп, количеством сшивок, размером пор ионита и составом раствора, находящегося в контакте с ионитом. Ее приходится учитывать при выборе ионитов, определении технологических параметров деминерализации воды и т. д.

Селективность ионитов, как правило, возрастает с увеличением заряда ионов, а в ряду ионов одинакового заряда – с увеличением радиуса негидратированного иона. Так, ионы  $\text{Fe}^{3+}$  сорбируются сильнее ионов  $\text{Mg}^{2+}$ , а  $\text{Mg}^{2+}$  – сильнее ионов  $\text{Na}^+$ . Селективность называют еще «средством иона к иониту».

Для сульфокатионитов (сильнокислотных катионитов) характерен следующий лиотропный ряд. Сродство к иониту катионов, стоящих в этом ряду, возрастает слева направо, т.е. «левые» поглощаются ионитом хуже катионов, стоящих справа (подразумевается, что концентрации ионов равны):  $\text{Li}^+ > \text{H}^+ > \text{Na}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{Rb}^+ > \text{Cs}^+ > \text{Ag}^+ > \text{Ti}^+ > \text{Mn}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Co}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{Rb}^{2+} > \text{Ba}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Fe}^{3+} > \text{Al}^{3+} > \text{Se}^{3+} > \text{J}^{3+} > \text{Eu}^{3+} > \text{Sm}^{3+} > \text{Nd}^{3+} > \text{Pr}^{3+} > \text{Ce}^{3+} > \text{La}^{3+}$  (По Ю.А. Кокотову).

По материалам фирмы «Ром и Хаас» лиотропный ряд имеет несколько другой вид:  $\text{H}^+ > \text{Li}^+ > \text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{Ag}^+ > \text{Ti}^+ > \text{Mn}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Co}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Cd}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Sr}^{2+} > \text{Rb}^{2+} > \text{Ba}^{2+} > \text{Al}^{3+}$ .

В частности для водоподготовки это означает, что при одинаковой концентрации в растворе иониты лучше поглощают ионы железа, причем  $\text{Fe}^{3+}$ , лучше чем  $\text{Fe}^{2+}$ , несколько хуже  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и еще меньше ионы калия и натрия. Кальций поглощается в 2,0–2,5 раза больше, чем натрий. Отсюда вытекают два следствия для технологии водоподготовки:

1) если ионит предназначен для умягчения или деминерализации воды, то в исходной воде должно быть как можно меньше железа и марганца;

2) при умягчении воды и при регенерации ионита раствором натрия хлорида вынужденно приходится тратить реагента намного больше, чем требуется по стехиометрическому соотношению.

Когда концентрации различных ионов не одинаковы, по закону действующих масс ионитом поглощаются ионы, присутствующие в наибольшей концентрации. Поэтому, к примеру, несмотря на меньшее сродство к катиониту иона натрия по сравнению с ионами кальция и магния, удастся регенерировать катионит – вытеснить из него ионы  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ , создавая большой избыток ионов натрия (для регенерации используется в виде концентрированного раствора).

Аналогичные суждения могут быть отнесены и к процессам последних стадий обессоливания воды, когда нужно извлечь ионы натрия (и калия). Необходимо затратить кислоту (ионы  $\text{H}^+$ ) в несколько большем количестве, чем следует по стехиометрии.

Обратный ряд селективности (при  $\text{pH} = 7$ ) для карбоксильных (слабокислотных) катионов в  $\text{Na}^+$ -форме:  $\text{Na}^+ > \text{K}^+ > \text{NH}_4^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Ni}^{2+} > \text{Co}^{2+} > \text{Zn}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{Fe}^{2+} > \text{Rb}^{2+} > \text{Cu}^{2+} > \text{H}^+$ .

Селективность сильноосновных анионитов уменьшается в последовательности:  $\text{SO}_4^{2-} > \text{SO}_3^{2-} > \text{J}^- > \text{HPO}_4^- > \text{NO}_3^- > \text{Br}^- > \text{Cl}^- > \text{HSiO}_3^- > \text{HCO}_3^- > \text{F}^- > \text{OH}^-$ .

Для слабоосновных анионитов в  $\text{OH}^-$ -форме следующий ряд:  $\text{HSiO}_3^- > \text{HCO}_3^- > \text{F}^- > \text{Cl}^- > \text{Br}^- > \text{NO}_2^- > \text{NO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{CrO}_4^{2-} > \text{анионные ПАВ} > \text{OH}^-$ .

Сильноосновные аниониты проявляют пониженную избирательность к иону гидроксида  $\text{OH}^-$ , т.е. другие ионы вытесняются гидроксидом из ионита при создании в воде концентрации иона  $\text{OH}^-$  больше концентрации упомянутых ионов в ионите.

Приведенные выше ряды селективности ионитов характерны для суммарного содержания ионов в воде не более 1000–1500 мг/дм<sup>3</sup>. При больших концентрациях раствора кислоты, например при 10 %-ной, ряды «обращаются»: сильнокислотный катионит более избирателен к иону натрия, а не кальция и т.п. То же характерно и для анионитов [30].

### 6.1.9. Плотность

Плотность ионита – показатель, определяющий гидродинамическое поведение ионита в противоточных фильтрах и в двухслойных фильтрах, например, при загрузке фильтров сильно- и слабоосновными анионитами.

Плотность ионитов находится в следующих пределах (в скобках – чаще всего), г/см<sup>3</sup>:

1,18–1,38 (1,28) – сильнокислотные катиониты;

1,13–1,20 (1,18) – слабокислотные катиониты;

1,07–1,12 (1,10) – сильноосновные аниониты;

1,02–1,10 (1,05) – слабоосновные аниониты.

## 6.2. Схемы ионитного химического обессоливания

В соответствии с требованиями к качеству добавочной воды её очищают по схемам частичного, глубокого или полного химического обессоливания.

Полное химическое обессоливание предусматривает три ступени очистки воды: обработку на Н-катионитных и анионитных фильтрах первой ступени, удаление углекислоты в декарбонизаторе, доочистку на Н-катионитных и анионитных фильтрах II ступени и, наконец, завершающую очистку на последовательно установленных Н- и ОН-ионитных фильтрах или ФСД.

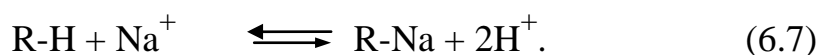
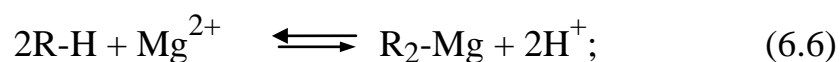
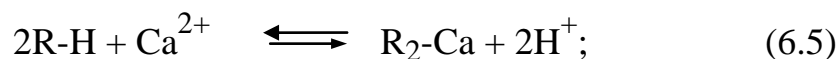


Схема глубокого химического обессоливания не имеет третьей ступени очистки воды. В схеме частичного химического обессоливания предусматривается установка двух последовательных ступеней Н-катионитных фильтров и одной анионитной ступени после декарбонизатора. В зависимости от состава и степени минерализации обрабатываемой воды первая ступень Н-катионирования может быть выполнена противоточной или ступенчато-противоточной по направлению потоков регенерационных растворов и фильтрующей воды. По ступенчато-противоточной схеме может быть выполнена и первая ступень анионирования при содержании анионов сильных кислот в обрабатываемой воде выше 4,0 мг-экв/дм<sup>3</sup>.

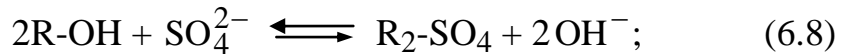
На ТЭС с барабанными котлами применяются двухступенчатые схемы обессоливания, на блоках с прямоточными котлами – трёхступенчатые схемы обессоливания добавочной воды, причём 3-й ступенью являются ФСД БОУ, а при использовании испарителей обязательной является доочистка дистиллята.

Целью катионирования является замена катионов обрабатываемой воды на катионы Н<sup>+</sup> или Na<sup>+</sup>, содержащиеся в катионите. Целью анионирования является замена анионитов обрабатываемой воды на анионы, содержащиеся в анионите. В свою очередь, катионитные фильтры могут работать по процессу натриевого катионирования (Na-катионирования) и водородного катионирования (Н-катионирования).

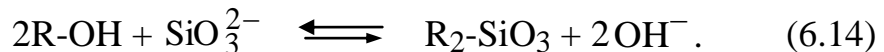
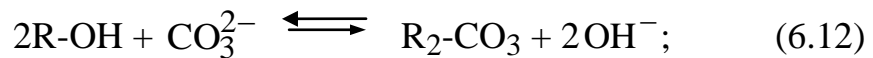
По размещению в схемах ВПУ ионитные фильтры делятся на фильтры I, II и III ступеней. Первая ступень Н-катионирования служит для обмена всех катионов обрабатываемой воды на катион водорода (в Н-катионите). Вторая ступень Н-катионирования предназначена для обмена натрия, «проскочившего» через Н-катионитный фильтр I ступени, или катионов, попавших в фильтрат из низкоосновных анионитов вследствие их старения или некачественной отмывки после регенерации. Третья ступень Н-катионирования служит для обмена на катион водорода натрия, попавшего в фильтрат из-за недостаточной отмывки высокоосновного анионита:



На анионитных фильтрах I ступени удаляются все анионы сильных кислот, образовавшихся при H-катионировании:



На последующих анионитных фильтрах идёт поглощение кремниевой кислоты, остаточного содержания угольной кислоты (после декарбонизатора), а также анионов, которые могут присутствовать в частично обессоленной воде после H-катионитных фильтров в результате недостаточной отмывки их после регенерации:



Для снижения расхода реагентов на обработку воды в схемах глубокого и полного химического обессоливания предусматривают возможность последовательного пропуска регенерационных растворов через фильтры I, II и III ступеней ионирования. Кроме того, с целью максимально возможного снижения или полного исключения кислых регенерационных стоков перед H-катионитными фильтрами устанавливают фильтры-утилизаторы кислоты (H-предвключенные), загруженные сульфоглём.

На ионитные фильтры должна подаваться вода после предварительной очистки коагулированием или известкованием с коагулированием. Без предварительной очистки может быть использована только артезианская вода.

В схемах обессоливания, как правило, предусматривают декарбонизацию воды, т.е. удаление из неё растворённой углекислоты, чтобы сократить затраты едкого натра на стадии сильноосновного анионирования. Угольную кислоту удаляют в специальных аппаратах – декарбонизаторах, или вакуумных деаэраторах. Наиболее распространены на ВПУ декарбонизаторы плёночного типа с насадкой из колец Рашига и вакуумные декарбонизаторы.

### **6.3. Аппараты ионитного химического обессоливания**

Очистка воды методом ионирования осуществляется в однотипных аппаратах – ионитных фильтрах. В зависимости от характера ионита, работающего в этих аппаратах, различают фильтры катионитные и анионитные.

Фильтры Н-катионитные и анионитные представляют собой цилиндры со сферическими днищами, рассчитанные на рабочее давление 0,6 МПа. Нижнее сферическое днище заполнено кислотоупорным бетоном, на котором расположено нижнее распределительное устройство, служащее для равномерной подачи и отвода воды по сечению фильтра. Щелевое нижнее распределительное устройство выполняется из нержавеющей стали в виде коллектора с отводящими трубами, отверстия в которых сверху прикрыты кожухом с перфорированными щелями. В верхней части фильтра расположено устройство для подачи обрабатываемой воды и регенерационного раствора, а также отвода взрыхляющей воды. Оно выполнено в виде отбойных щитков или перфорированных лучей с центральной распределительной коробкой. Внутренняя поверхность фильтров защищена антикоррозионным покрытием. В фильтрах предусматривается засыпка подстилочных слоёв из специально подготовленного дроблёного антрацита фракции 2–3 мм. Дроблёный антрацит для удаления солей жесткости и кремниевой кислоты промывают 3–5 %-ным раствором соляной кислоты с последующей отмывкой водой до нейтральной реакции фильтрата. Рекомендуемая высота загрузки ионитов в фильтры, м: катионитные I, II, III ступеней – соответственно 2,5–3,0; 1,8–1,5; 1,2–1,5; анионитные I, II, III ступеней – соответственно 2,0; 1,8–1,5; 1,2–1,5.

Типы ионитных фильтров, применяемых для очистки воды и конденсата на ТЭС, представлены в табл. 6.2 [1].

Типы ионитных фильтров для очистки воды и конденсата на ТЭС

Тип и обозначение ионитного фильтра	Наименование	Назначение	Внутренний диаметр, мм	Условное давление, МПа
ФИПаI	Параллельноточные I ступени	Для умягчения и химического обессоливания природных вод в качестве первой ступени обработки	1000, 1400, 1600, 2000, 2600, 3000, 3400	0,6
ФИПаII	Параллельноточные II ступени	То же для воды прошедшей обработку на ФИПаI		0,6
ФИПр	Противоточные	Для умягчения и химического обессоливания высокоминерализованных природных вод	1600, 2000, 2600, 3000	0,6
ФИПр-2х	Противоточные двухходовые	Для умягчения и химического обессоливания высокоминерализованных природных вод в одноступенчатых схемах	1600, 2000, 2600, 3000, 3400	0,6
ФИСДНР	Смешанного действия с наружной (выносной) регенерацией	Для ионитной очистки турбинного конденсата	2000, 2600, 3000, 3400	0.6 1.0
ФИСДВР	Смешанного действия с внутренней регенерацией	Для ионитной очистки турбинного конденсата, а также в схемах глубокого химического обессоливания в качестве последней ступени обработки	2000, 2600, 3000, 3400	0,6 1,0

#### 6.4. Типы регенерации ионитных фильтров

Ионообменные фильтры разделяют по крупности используемой фракции на насыпные и намывные. Фильтры насыпного типа различают по технологическому предназначению (катионитные, анионитные, фильтры смешанного действия – ФСД) и по способу выполнения технологических операций (параллельноточные, противоточные, ступенчато-противоточные и фильтры с выносной регенерацией). Насыпные фильтры с одинаковым по характеру ионообменным материалом (катионит, анионит) подразделяют также на фильтры I и II ступеней. Эти фильтры различаются сортами засыпаемого в них ионита и конструктивными особенностями.

При параллельноточной регенерации обрабатываемую воду и регенерационный раствор пропускают через ионообменный фильтр в одном и том же направлении; при противоточной регенерации – в противоположных направлениях. Ступенчато-противоточные регенерации, когда обрабатываемую воду пропускают последовательно через фильтры I и II ступени, а регенерационный раствор в противоположном направлении (рис. 6.1). Регенерацию ионитов фильтров смешанного действия проводят после разделения ионообменной смолы на катиониты и аниониты.

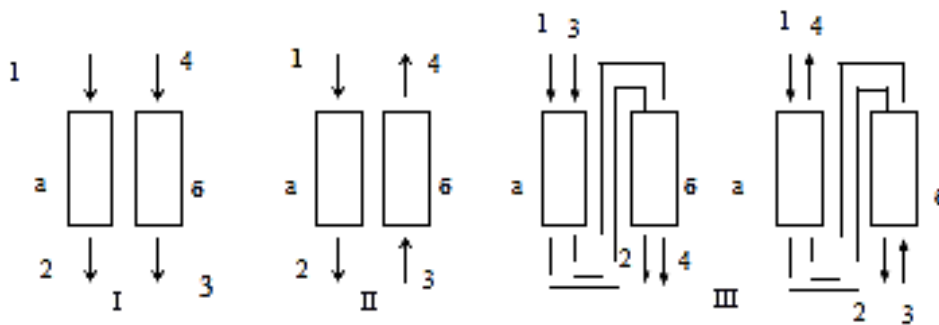


Рис. 6.1. Типы регенерации ионитных фильтров:

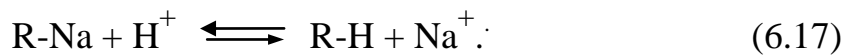
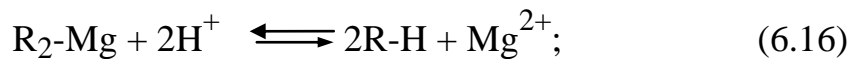
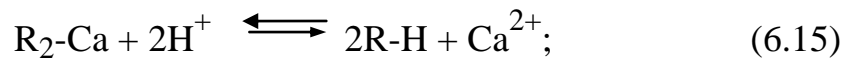
- I – схема параллельноточной регенерации; II – схема противоточной регенерации;  
 III – схема ступенчатой регенерации; 1 – обрабатываемая вода; 2 – фильтрат;  
 3 – вход регенерационного раствора; 4 – выход регенерационного раствора;  
 а – работа, б – регенерация

Ионитный параллельноточный фильтр I ступени состоит из корпуса, нижнего и верхнего дренажно-распределительного устройства, трубопроводов, арматуры, устройства для отбора проб на химический анализ. Корпус представляет собой сварной цилиндр, изготовленный из листовой стали, с приваренными к нему верхним и нижним эллиптическими днищами. Корпус фильтра снабжён двумя люками. Верхний люк служит для загрузки фильтрующего материала, осмотра и ремонта элементов верхнего дренажно-распределительного устройства, а также для контроля за состоянием поверхности фильтрующего материала. Нижний люк – для производства монтажных работ внутри фильтра, контроля за состоянием нижнего дренажно-распределительного устройства и его ремонта. В верхней части фильтра к корпусу приварен трубопровод для гидравлической загрузки фильтрующего материала. В нижней части фильтра на уровне нижнего дренажно-распределительного устройства имеется трубопровод для гидравлической выгрузки фильтрующего материала. К верхнему днищу фильтра приварены две косынки, необходимые для подноса фильтра при его транспортировке и установке на фундамент. Для отвода воздуха из фильтра при заполнении

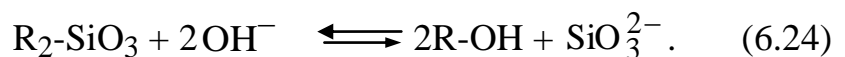
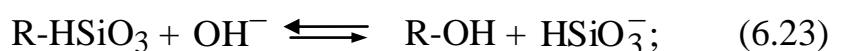
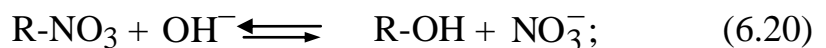
его водой к верхнему днищу приведена труба-воздушник. Верхнее дренажно-распределительное устройство служит для подачи в фильтр и равномерного распределения по площади поперечного сечения фильтра обрабатываемой воды и регенерационного раствора, а также для сбора и отвода из фильтра взрыхляющей воды. Оно состоит из вертикально расположенного отрезка трубы-коллектора, изготовленного из полиэтилена и заглушенного снизу, радиально расположенных перфорированных труб-лучей, изготовленных из полиэтилена и вставленных в отверстия коллектора. Наружные концы лучей заглушены и прикреплены к внутренней поверхности конуса фильтра. Лучи установлены таким образом, чтобы отверстия их были направлены вверх. Нижнее дренажно-распределительное устройство предусмотрено для сбора и отвода из фильтра отработанной воды, регенерационного раствора и отмывочной воды, а также для подачи в фильтр и равномерного распределения по площади поперечного сечения взрыхляющей воды. Нижнее устройство состоит из вертикального коллектора, изготовленного из коррозионно-стойкой стали с заглушенным верхним концом, двух горизонтальных полимерных труб – отводов, вставленных в отверстие в коллекторе. В отверстия отводов вставлены распределительные трубы, наружные концы которых заглушены. Распределительные трубы изготовлены из щелевых полиэтиленовых колец, насаженных на трубу-стяжку из полиэтилена. Нижнее днище фильтра заливают бетоном с наполнителем из антрацита. Верхний слой заливки, на который опираются элементы нижнего распределительного дренажа, может быть выполнен в виде трубчатой системы со щелевыми колпаками типа ВТИ-К. Применяют также щелевые колпачки конструкции ВНИИАМ, изготовленные из сополимера стирола СНП-2. Эти щелевые колпачки являются химически стойкими при контакте с водой и растворами солей, кислот и щелочей, имеющими концентрацию 5–10 %. Они являются механически стойкими при гидравлическом сопротивлении до 0,2 МПа. Пробоотборное устройство состоит из нержавеющей трубок, присоединенных к трубопроводам подачи и отвода, манометров, показывающих гидравлическое сопротивление фильтрующего слоя. Ионитный параллельный фильтр II ступени состоит из корпуса, дренажно-распределительных устройств, трубопроводов, арматуры, пробоотборных устройств. Корпус цилиндра представляет собой цилиндр, сваренный из листовой углеродистой стали, с приваренными эллиптическими штампованными днищами. Фильтр установлен на фундамент с помощью трёх опор, приваренных к нижнему днищу, и оборудован двумя люками. Верхний люк предназначен для загрузки фильтрующего материала, монтажа и ремонта верхнего

дренажно-распределительного устройства, а также для контроля за состоянием поверхности фильтрующего материала. Нижний люк служит для обеспечения монтажа всех устройств внутри фильтра, а также для ремонта нижнего дренажно-распределительного устройства. Фильтр снабжён трубопроводом для гидравлической загрузки и выгрузки фильтрующего материала.

Регенерация Н-катионитных фильтров производится раствором серной кислоты с концентрацией от 1 до 5 %. Регенерация должна проходить в три этапа, т.е. первые 10 минут концентрация раствора кислоты должна быть 1–1,5 %; на втором этапе в течение 7 минут концентрация – 2–3 %, на третьем этапе используют 1/3 часть кислоты от общего расхода с концентрацией 4–5 %:



Регенерация ОН-анионитных фильтров производится раствором едкого натра NaOH концентрацией от 3 до 4 %:



### 6.5. Технология противоточного натрий-катионирования в промышленной котельной

При подготовке воды для промышленных и отопительных котельных используют в основном методы известкования, подкисления, натрий-катионирования, водород-катионирования с «голодной» регенерацией.

Исходное качество воды определяет метод или сочетание методов в каждом конкретном случае. Наиболее распространенный метод – натрий-катионирование.

Эксплуатация натрий-катионитных фильтров в режиме прямотока имеет ряд серьезных недостатков, к которым относятся:

- многоступенчатость процесса в случае необходимости глубокого умягчения воды (до  $J = 0,01$  ммоль/л);
- значительный расход реагентов на регенерацию, превышающий стехиометрические значения в 1,7 раза;
- образование сточных вод, объем которых составляет 10–30 % производительности установки, с минерализацией 3–10 г/дм<sup>3</sup>.

Одним из основных направлений уменьшения удельного расхода реагентов, сокращения металлоемкости оборудования и объемов сброса солевых сточных вод является применение технологии противоточного обессоливания ионированием. Эффект улучшения качества фильтрата и сокращения расхода реагентов при противотоке достигается за счет регенерации свежим раствором наименее загрязненных выходных слоев смолы. Избыток реагента в этих слоях, обеспечивающий глубину очистки воды, превышает расчетный в несколько раз.

Кроме того, по мере продвижения регенерационного раствора в более истощенные слои создается равновесие между концентрацией десорбируемых ионов в растворе и в слоях, что исключает нежелательные повторные процессы сорбции – десорбции, характерные для прямотока.

Введение противотока даже в одну ступень позволяет получить минимальную остаточную концентрацию катионов жесткости. В слое катионита нарастание концентрации идет плавно по мере истощения катионита. При прямотоке минимальное и сравнительно большое содержание удаляемых ингредиентов достигается уже при 40–60 % истощения катионита, а затем еще более возрастает.

Для реализации преимуществ противоточного ионирования необходимо обеспечить неподвижность слоя ионита во время рабочего цикла и регенерации и возможность свободного расширения в период взрыхления. При нарушении распределения слоев катионита качество фильтрата ухудшается, и нивелируется эффект противоточной технологии.



Существуют системы противоточного ионирования, в которых подача обрабатываемой воды происходит как сверху вниз, так и снизу вверх. Условно все противоточные системы можно разделить на погруженные коллекторные и с плавающим слоем. За рубежом погруженные коллекторные системы широко используются и предполагают устройство нижнего, среднего и верхнего дренажей. Средний дренаж скрыт в верхнем слое катионита и предназначен для вывода регенерационного раствора. Обрабатываемая вода подается сверху, регенерационный раствор – снизу. Во время регенерации слой смолы поддерживается в компактном состоянии потоком воды или сжатого воздуха. Эта конструкция позволяет взрыхлять верхний слой смолы, не нарушая нижние.

На аналогичном принципе основана противоточная технология консорциума «Аквахим», используемая в отечественной практике. Опыт монтажа, наладки и эксплуатации противоточных фильтров конструкции «Аквахим» выявил такие недостатки, как:

- громоздкость и сложность крепления среднего дренажа, трудность его надежного блокирования;
- нерациональное использование полезного объема фильтра;
- низкая допустимая скорость фильтрования.

Указанных недостатков во многом лишены системы противотока с плавающим слоем. Наиболее известными из таких систем являются «Швебебет», «Апкоре» и «Амберпак». Общим для противоточных фильтров, используемых в этих системах, является наличие нижнего и верхнего дренажных устройств.

В системе «Швебебет» подача обрабатываемой воды производится снизу вверх, регенерационного раствора – сверху вниз. Фильтр практически полностью заполняется смолой, чтобы предотвратить её слишком большое разжижение. Часть небольшого остаточного объема заполняется инертным материалом, предотвращающим засорение колпачков верхней дренажной системы мелкими частицами смолы. Перед регенерацией уплотненный слой катионита опускается к нижнему дренажу при одновременном разрыхлении, что, по мнению разработчиков технологии, позволяет исключить отдельную стадию взрыхления. Периодически, по мере увеличения сопротивления фильтра, смола перегружается в специальную колонну обратной промывки для эффективного взрыхления.

Серьезным недостатком данной технологии является необходимость постоянного прижатия слоя к верхней дренажной системе для поддержания постоянного расхода воды, поступающей в фильтр. В противном случае наблюдается ухудшение качества обрабатываемой воды.

Система «Амберпак» по направлению движения потоков аналогична системе «Швебебет», но предусматривает загрузку всего объема фильтра смолой и периодическую отмывку нижнего слоя смолы в специальной емкости. Основным недостатком этой системы – высокая чувствительность к содержанию взвешенных частиц в исходной воде.

При противоточной технологии «Апкоре» фильтр загружается на 80–85 % катионитом и на 8–10 % инертным материалом. Цикл работы фильтра состоит из операций обработки воды в направлении сверху вниз, прижатия слоя смолы к верхней дренажной системе потоком воды, затем – регенерация и отмывка – снизу вверх.

На наш взгляд, фильтрование воды сверху вниз по способу «Апкоре» предпочтительнее, так как в этом случае исключается зависимость эффекта умягчения от колебания нагрузки на установку. Кроме того, вследствие вытеснения менее плотной жидкости (воды) более плотной (регенерационным раствором), разбавление реагента водой минимально, регенерация происходит с меньшими затратами реагентов.

Особый интерес представляет прижатие слоя смолы к инертной загрузке, которое производится водой снизу с высокой скоростью и, по сути, является взрыхляющей промывкой. Эта операция позволяет эффективно удалять загрязнения в виде высокодисперсной взвеси, включая мелкие фракции смолы, накопившиеся в верхнем слое. Эффект очистки существенно превосходит традиционную взрыхляющую промывку. Линейная скорость потока, подаваемого для зажатия слоя, в несколько раз больше, чем при традиционном взрыхлении. При противотоке по системе «Апкоре» слой смолы находится в зажатом состоянии, и основным фактором очистки является величина относительной скорости движения фаз жидкость – твёрдое тело на границе их раздела.

Эффективность применения зарубежных технологий, в частности «Апкоре», в существенной степени определяется применением специальных марок катионитов с низкой степенью неоднородности зерен загрузки, т.е. монофазы. Высокая стоимость зарубежных монодисперсных катионитов делает их применение для отечественной водоподготовки весьма проблематичным.

В связи с этим была рассмотрена возможность реализации противоточного обессоливания ионированием на основе применения отечественного катионита КУ-2-8. Вследствие значительной неоднородности гранул этого материала при загрузке всего объема фильтра возрастание потери напора неизбежно. Кроме того, в отдельных случаях,

в связи с высоким уровнем загрязнения исходной воды механическими и биологическими примесями, органическими соединениями возможна значительная кольматация не только верхнего слоя смолы, но и глубинных слоев, что также приводит к росту гидравлического сопротивления слоя.

Анализ существующих вариантов систем противоточного умягчения воды позволяет сделать вывод о предпочтительности использования фильтров, оборудованных нижним и верхним дренажом, в которых движение воды идет сверху вниз, а регенерационного раствора и отмывочной воды – снизу вверх. Инертный материал занимает 10 % полезного объема фильтра. Особенностью технологии является периодическая перегрузка смолы в емкость взрыхляющей промывки в количестве, необходимом для эффективного удаления взвешенных веществ и мелких фракций смолы.

На данном принципе основана технология противоточного ионирования НИИ «ВОДГЕО» и НПФ «ЭКОС», защищенная патентом РФ. Разработчик конструкторской документации и изготовитель оборудования – НПФ «ЭКОС». Фильтры выпускаются диаметром 0,4; 0,7; 1,0; 1,4 м с ёмкостью взрыхляющей промывки диаметром 1,5 и 1,8 м. Рекомендуемая скорость фильтрования при жесткости исходной воды до 10 ммоль/л – 40 м/ч.

Противоточные фильтры оборудованы средним фланцевым разъемом, смотровыми стеклами в нижней и верхней части корпуса, штуцерами для перегрузки смолы, дренажными колпачками из нержавеющей стали, выпускаемыми предприятием «ТЭКО-ФИЛЬТР». Фильтры имеют внутреннее антикоррозионное покрытие эпоксидной смолой.

Технология ориентирована на использование отечественного катионита КУ-2-8, но имеет все преимущества противотока, а высокая надежность достигается периодической взрыхляющей промывкой всего объема смолы.

Обрабатываемая вода с содержанием взвешенных веществ до 8 мг/л пропускается через противоточный фильтр, практически полностью загруженный смолой и инертным материалом. В начальный период гидравлическое сопротивление слоя смолы не превышает 80 кПа. Регенерацию и отмывку осуществляют в противотоке. По мере загрязнения слоя производят гиперперегрузку от 20 до 80 % объёма смолы. Взрыхляющую промывку всего объёма смолы проводят одним потоком воды, последовательно проходящим противоточный фильтр с интенсивностью 1,25–2,50 л/(м<sup>2</sup>·с), а затем колонну взрыхляющей промывки с интенсивностью 2,50–5,00 л/(м<sup>2</sup>·с).

Эти значения интенсивности обеспечиваются соответствующим расходом воды и соотношением диаметров фильтра и колонны взрыхляющей промывки. Наиболее загрязненная часть смолы, отводимая в колонну взрыхляющей промывки, подвергается более интенсивной очистке во взвешенном слое, что способствует удалению мелких фракций смолы при очистке от механических и биологических загрязнений.

Данная технология реализована в котельной ОАО «Плутон». Проект ВПУ на воде из московского водопровода выполнен ГПК НИИСантехпроект.

В соответствии с проектом производительность ВПУ составляет  $15 \text{ м}^3/\text{ч}$ . На первой ступени натрий-катионирования используются три противоточных фильтра диаметром 0,7 м, загруженных катионитом КУ-2-8 и инертным материалом ДАУЭКС IF-62. На второй ступени используют два существующих фильтра диаметром 1,0 м, загруженных сульфоуглем. Химически очищенная вода с жесткостью 0,01 ммоль/л направляется на подпитку паровых водогрейных котлов.

В настоящее время фактическая производительность ВПУ не превышает 10 м/ч. В эксплуатации находятся только противоточные фильтры первой ступени, обеспечивающие требуемую глубину умягчения.

Основные полученные результаты:

- рабочая динамическая обменная емкость КУ-2-8 – 1100–1200 моль/м<sup>3</sup>;
- удельный расход поваренной соли на регенерацию – 100–110 г/моль;
- жесткость умягченной воды в течение основной части фильтроцикла – 0,010–0,01 ммоль/л;
- удельный расход воды на отмывку –  $1 \text{ м}^3/1 \text{ м}^3$  загрузки.

Таким образом, получены положительные результаты применения противоточной технологии натрий-катионирования в схеме подготовки воды для питания паровых и водогрейных котлов с использованием катионитов КУ-2-8 [28].

## **6.6. Фильтры смешанного действия с внутренней регенерацией.**

### **Устройство и назначение**

Ионитный фильтр смешанного действия с внутренней регенерацией (ФСДВР) представляет собой вертикальный однокамерный аппарат и состоит из следующих основных элементов: корпуса, верхнего, среднего, нижнего распределительных устройств, трубопроводов, запорной арматуры, пробоотборного устройства и фильтрующей загрузки.

Корпус фильтра цилиндрический, сварной из листовой стали, с приваренными эллиптическими штампованными днищами. К нижнему днищу приварены три опоры для установки фильтра на фундамент. Корпус фильтра снабжен двумя лазами. Верхний эллиптический лаз предназначен для загрузки фильтрующего материала, ревизии верхней распределительной системы и периодического осмотра состояния поверхности фильтрующего материала. Через нижней люк выполняют монтаж всех устройств внутри корпуса фильтра, периодический осмотр и ремонт среднего и нижнего распределительных устройств, нанесение антикоррозионных покрытий.

На обечайке корпуса на уровне среднего распределительного устройства размещено смотровое окно, позволяющее вести наблюдение за разделением катионита и анионита. В центрах верхнего и нижнего днищ фильтра приварены фланцы, к которым снаружи присоединяют трубопроводы, а внутри – верхнее и нижнее распределительные устройства.

К верхнему днищу корпуса фильтра приварены две косынки для подъёма корпуса фильтра при его транспортировке и установке на фундамент. Для периодического отвода воздуха, скапливающегося в верхней части фильтра, имеется трубка с клапаном. На уровне нижнего распределительного устройства к корпусу фильтра приварен штуцер для гидравлической загрузки фильтрующего материала.

Верхнее распределительное устройство предназначено для подачи в фильтр на обработку добавочной воды или конденсата, воды или конденсата при отмывке ионитов от продуктов регенерации, блокирующего потока воды или конденсата при пропуске через катионит регенерационного раствора кислоты, для подачи регенерационного раствора едкого натра при регенерации анионита, а также для сброса потока воды при взрыхлении и разделении ионитов.

Верхнее сборно-распределительное устройство состоит из двух вставленных друг в друга перфорированных патрубков («стакан в стакане»), нижний конец которых заглушен; верхний конец внутреннего патрубка соединён с подающей трубкой, а нижний патрубок верхним концом прикреплен к верхнему сферическому днищу. Среднее распределительное устройство предназначено для отвода из фильтра отработавших регенерационных растворов и блокирующих потоков воды или конденсата при регенерации ионитов, а также потоков воды или конденсата при отмывке ионитов после их регенерации. Оно состоит из расположенного по диаметру фильтра коллектора, соединенного

с отводящим трубопроводом. С обеих сторон коллектора в его отверстия вставлены перфорированные распределительные трубы с обжатыми на конус концами; другие их концы заглушены. На нижней образующей распределительных труб расположены отверстия, закрытые щелевые желобками.

Места сочленения распределительных труб с коллекторами уплотнены нижними болтами через полосы, приваренные к стенкам корпуса. Распределительные трубки установлены строго горизонтально. При нормальной работе фильтра и во время его регенерации возникают большие усилия, действующие на среднее распределительное устройство в вертикальном направлении как сверху, так и снизу. В связи с этим предусмотрено специальное крепление коллектора и труб распределительного устройства к корпусу фильтра.

Нижнее распределительное устройство предназначено для сбора обессоленной и обескремненной воды или конденсата при работе и отмывке фильтрующего слоя, для подвода воды или конденсата и воздуха при взрыхлении ионитной шихты и разделении ионитов, для подачи регенерационного раствора кислоты при регенерации катионита.

Нижнее распределительное устройство состоит из вертикального коллектора с заглушенным верхним концом, четырёх отводов-коллекторов, вставленных в радиально расположенные отверстия вертикального коллектора. Для максимального приближения к днищу фильтра коллекторы-отводы расположены под углом к горизонтальной плоскости, они крепятся к вертикальному коллектору сваркой.

От каждого коллектора-отвода с одной стороны, также под углом к горизонтальной плоскости, отходят перфорированные распределительные трубы, по нижней образующей которых в два ряда расположены отверстия; отверстия перекрыты приваренными щелевыми желобками с шириной щели 0,25 мм. Концы распределительных труб, вставляемые в отверстия коллекторов-отводов, обжаты на конус, а противоположные концы заглушены; места сочленения распределительных труб с отводами уплотнены нажимными болтами через специальные полосы, прикреплённые с одной стороны к отводам, а с другой – к корпусу, и фиксированы прерывистым сварным швом.

ФСД загружается катионитом и анионитом, которые после их отдельной регенерации соответственно кислотой и щелочью тщательно перемешиваются путем подачи в фильтр снизу вверх сжатого воздуха.

При пропускании через ФСД воды происходит глубокое обессоливание и обескремнивание воды, благодаря наличию в нём огромного числа  $\text{H}^-$  и  $\text{OH}^-$ -ионирования. Чтобы осуществить регенерацию истощенного ФСД, необходимо произвести разделение ионитов путём взрыхляющей промывки водой снизу вверх. Периодическое разделение ионитов для регенерации и последующее перемешивание их предъявляют требования к физическим характеристикам загруженных в эти фильтры материалов: механической прочности, различию в плотностях ионитов, форме частиц. Наиболее подходящие для загрузки ФСД: КУ-2, АВ-17.

Верхнее распределительное устройство служит для подвода исходной воды, подачи регенерационного раствора щелочи и воды на отмывку, для отвода в дренаж воды при взрыхлении загрузки. Среднее – для подачи регенерационного раствора кислоты и вывода отработанного регенерационного раствора щелочи. Нижнее – для вывода обессоленной воды и отработанного раствора кислоты, а также для подачи в фильтр воды для разделения ионитов и воздуха для их перемешивания.

Регенерационный цикл ФСДВР состоит из следующих операций, проведенных последовательно.

1. Взрыхление смеси ионитов восходящим потоком воды с интенсивностью  $2-3 \text{ кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , приводящее к разделению смеси в соответствии с различием удельных масс катионита  $q_{\text{КТ}}$  и анионита  $q_{\text{АН}}$ , так как  $\rho_{\text{КТ}} > \rho_{\text{АН}}$ , то скорость свободного падения зёрен катионита будет большей. При прекращении подачи взрыхляющей воды формируются два слоя ионитов: нижний – катионитный и верхний – анионитный. Так как скорость оседания частиц зависит от их диаметра, то для количественного разделения смеси предложено из анионита удалять гидравлическим путем наиболее крупную фракцию ( $\sim 1,5 \text{ мм}$ ), а из катионита – наиболее мелкую (менее  $0,3 \text{ мм}$ ). Отсевшиеся фракции ионитов обычно используются в ионитных фильтрах ФСД.

2. Пропуск регенерационных растворов с отводом их из среднего дренажно-распределительного устройства: через слой анионита – щелочи с концентрацией 4 % со скоростью 4 м/г; через слой катионита – 1,5–2 % серной кислоты со скоростью 10 м/ч. Растворы могут пропускаться либо одновременно, либо последовательно. Во втором случае через другой слой пропускается запирающий поток воды, который также отводится через среднее дренажно-распределительное устройство. Такой приём предотвращает контакт с раствором отрегенированного ионита и переход его в солевую форму.

### **6.7. Фильтры смешанного действия с наружной регенерацией. Устройство и назначение**

Ионитный фильтр смешанного действия с наружной регенерацией (ФСДНР) представляет собой вертикальные однокамерные цилиндрические аппараты. Каждый фильтр состоит из следующих основных элементов: корпуса, верхнего и нижнего распределительных устройств, распределительных устройств для медленного заполнения фильтра конденсатом после перемешивания отрегенированной шихты сжатым воздухом, трубопроводов, запорной арматуры, пробоотборных устройств и фильтрующей загрузки.

Корпус фильтра цилиндрический, сварной из листовой стали, с приваренными эллиптическими штампованными днищами. Корпус фильтра снабжён двумя лазами. Верхний лаз предназначен для загрузки фильтрующего материала, ревизии верхней распределительной системы и периодического осмотра состояния поверхности фильтрующего материала. Через нижний люк выполняют монтаж всех устройств, находящихся внутри корпуса фильтра, периодические осмотры и ремонт нижних распределительных устройств, нанесение антикоррозионных покрытий. На обечайке корпуса размещены смотровые окна, позволяющие вести наблюдение за слоем ионита, в том числе при гидроперегрузке. В центрах верхнего и нижнего днищ фильтров приварены фланцы, к которым снаружи присоединяют трубопроводы, а внутри – верхнее и нижнее распределительные устройства. Вблизи от центра нижнего эллиптического днища фильтра приварен штуцер для гидравлической выгрузки фильтрующего материала; штуцер для гидравлической загрузки фильтрующего материала приварен вверху цилиндрической части корпуса фильтра.

Верхнее распределительное устройство предназначено для равномерного распределения по сечению фильтра обрабатываемой воды и отвода воды при подрыхлении слоя перед его гидроперегрузкой. Оно состоит из двух вставленных друг в друга перфорированных патрубков, нижний конец которых заглушен; верхний конец внутреннего патрубка соединён с подающей трубой, а наружный патрубок верхним концом прикреплен к верхнему эллиптическому днищу.

Нижнее распределительное устройство предназначено для сбора отработанной воды, конденсата и отмывочной воды, а также для распределения по сечению фильтра взрыхляющей воды и сжатого воздуха.



Нижнее распределительное устройство состоит из вертикального патрубка с заглушенным верхним концом, четырёх коллекторов-отводов, вставленных в радиально расположенные отверстия вертикального патрубка и размещенных для максимального приближения к днищу фильтра под углом к горизонтальной плоскости. Коллекторы-отводы прикреплены к вертикальному патрубку сваркой. От каждого коллектора-отвода с одной стороны под углом к горизонтальной плоскости отходят перфорированные распределительные трубы, по нижней образующей которых в два ряда расположены отверстия; отверстия перекрывают приваренные щелевые желобки с шириной щели 0,25 мм. Концы распределительных труб, вставляемые в отверстия коллекторов-отводов, обжаты на конус, а противоположные концы заглушены. Места сочленения распределительных труб с отводами уплотнены нажимными болтами через специальные полосы, прикреплённые с одной стороны к отводам, а с другой – к корпусу, и фиксированы прерывистым сварным швом. Распределительное устройство для медленного заполнения фильтра водой используется после перемешивания катионита и анионита в фильтрующей загрузке. Оно представляет собой размещенный по хорде окружности корпуса фильтра коллектор, соединенный с подводящей трубой, к которому подсоединены расположенные в горизонтальной плоскости распределительные трубы с отверстиями. Отверстия размещены на верхней части поверхности труб по двум образующим в шахматном порядке. Наружные концы труб и коллектора заглушены и прикреплены к планкам, приваренным к корпусу фильтра.

Фильтр-регенератор представляет собой вертикальный однокамерный цилиндрический аппарат и состоит из следующих основных элементов: корпуса, верхнего и нижнего распределительных устройств, трубопроводов, запорной арматуры и пробоотборных устройств. Корпус цилиндрический, сварной из листовой стали с приваренными эллиптическими штампованными днищами. К нижнему днищу приварены три опоры для установки регенератора на фундамент. Корпус имеет два лаза, которые позволяют наносить на внутреннюю поверхность защитные коррозионностойкие покрытия, производить монтаж и ремонт всех внутренних устройств и выполнять все необходимые работы внутри аппарата. Фильтр-регенератор имеет два смотровых окна для наблюдения за состоянием ионитов во время регенерации и гидроперегрузки.

Верхнее распределительное устройство предназначено для отвода из регенератора воды при взрыхлении и разделении шихты, подвода регенерационного раствора щелочи и воды. Данное устройство состоит

из вертикального коллектора с заглушенным нижним концом и радиально расположенными отверстиями, в которые вставлены перфорированные трубы с обжатыми на конус концами; места сочленения труб с коллектором уплотняются нажимными болтами через специальные кронштейны, приваренные к корпусу фильтра-регенератора. К кронштейнам прикреплены заглушенные концы перфорированных труб. Данные трубы расположены строго горизонтально отверстиями вверх.

Среднее распределительное устройство предназначено для сбора отработавших регенерационных растворов кислоты и щелочи, а также воды при предварительной отмывке катионита и анионита от продуктов регенерации и остатка регенерационных растворов. Устройство состоит из горизонтального коллектора с отверстиями, в которые вставлены распределительные трубы с обжатыми на конус концами; противоположные концы труб заглушены. Коллектор соединён с наружным трубопроводом. Распределительные трубы перфорированы отверстиями, расположенными по нижней образующей. Отверстия перекрывают приваренные щелевые желобки. Места сочленения распределительных труб с отводами уплотнены нажимными болтами через специальные полосы, прикреплённые с одной стороны к отводам, с другой – к конусу, и фиксированы прерывистым сварным швом. Среднее распределительное устройство расположено строго горизонтально.

Нижнее распределительное устройство предназначено для подвода воды при взрыхлении и разделении ионитов, сжатого воздуха, регенерационного раствора кислоты, воды при отмывке катионита от продуктов регенерации, а также воды при гидроперегрузке ионитовой шихты в рабочий фильтр. Нижнее распределительное устройство состоит из вертикального коллектора с заглушенным верхним концом, двух коллекторов-отводов, вставленных в радиально-расположенные отверстия коллектора, а также распределительных труб, расположенных в горизонтальной плоскости перпендикулярно к коллекторам-отводам по обе стороны от них. Распределительные трубы составлены из щелевых колец, вставленных одно в другое и насаженных на трубку-стяжку. Места сочленения распределительных труб с отводами уплотнены болтами через специальные полосы, прикреплённые с одной стороны к отводам, с другой к стенке корпуса регенератора. Нижнее днище под нижним распределительным устройством забетонировано.

### ***6.7.1. Регенерация фильтра смешанного действия с наружной регенерацией***

Наличие готовой загрузки отрегенированных ионитов в запасном бункере 1 значительно сокращает продолжительность вывода ионитных фильтров на регенерацию (рис.6.2) [5]. В то время как при «внутренней регенерации» ФСД выводятся из работы на 4–5 ч, при «внешней» регенерации истощенные иониты заменяются путем гидроперегрузки заранее отрегенированной смесью катионитов и анионитов в течение не более 1 ч, что увеличивает долю рабочего времени ФСД.

Кроме того, упрощаются конструкции внутренних устройств и наружных коммуникаций на фронте этих фильтров, что облегчает обслуживание и ремонт аппаратуры и повышает степень её готовности. Применение «внешней» регенерации исключает возможность попадания регенерационных растворов кислоты или щелочи в конденсат, сокращает количество арматуры, устраняет надобность в кислотостойких материалах и покрытиях для рабочих фильтров, упрощает конструкцию последних, даёт возможность повысить скорость фильтрования конденсатов (до 125 м/ч), снижает потребность в контрольно-измерительной аппаратуре и т.д.

За рубежом эксплуатируются фильтры для непрерывного противоточного процесса ионного обмена с выносной регенерацией ионитов в схемах установок для приготовления добавочной питательной воды парогенераторов и для очистки конденсата.

Процесс осуществляется в последовательно включенных колоннах (рабочей, регенерационной и отмывочной). В рабочих и регенерационных колоннах используется компактный движущийся слой ионита, а в отмывочных – псевдооживленный. На этих установках автоматически поддерживаются на заданном уровне расходы исходной воды, регенерационного раствора, разбавляющей и отмывочной воды, а циркуляция ионита регулируется путем изменения интервала времени, в течение которого опорожняется бункер отмывочной колонны. При изменении состава исходной воды соответственно изменяются скорости ввода регенерационного реагента и циркуляции ионита. Транспорт ионита осуществляется гидравлическим способом; каждая колонна рассчитывается в соответствии с характеристиками осуществляемого в ней процесса. Колонны оснащены устройствами для распределения потоков жидкости в слое ионита.

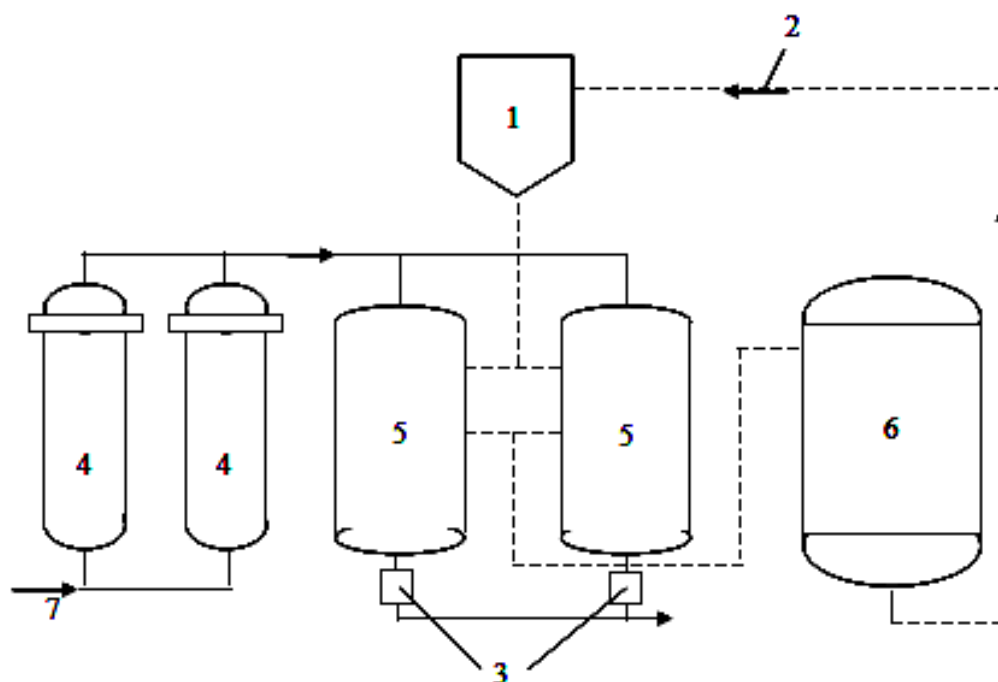


Рис. 6.2. Схема установки для обессоливания конденсата с внешней регенерацией ионов:

- 1 – бункер для смеси отрегенированных ионов;  
 2 – гидрперегрузка отрегенированных ионов; 3 – ловушка для ионов;  
 4 – осветлительные фильтры; 5 – фильтры смешанного действия;  
 6 – внешний регенератор; 7 – вход воды

Поддержание ионитового слоя в рабочей и регенерационной колоннах в уплотнённом состоянии предотвращает ожидение слоя и способствует лучшему использованию ионита, повышению чистоты фильтрата. Раздельное расположение колонн при функциональной их связи для непрерывности транспортировки ионита в соответствующие аппараты позволяет применять расположенную по ходу потока линию для транспортировки ионита в запасные бункера для регулирования потока ионита без использования клапанов, тормозящих движение и вызывающих чрезмерное истирание ионита. Автоматическая работа колонн истощения, регенерации и отмывки ионов сводит к минимуму численность обслуживающего персонала.

Благодаря эффективному использованию ренегерирующих реагентов резко сокращаются габариты и стоимость эксплуатации систем для нейтрализации стоков; отработавшие регенерационные растворы обрабатываются при весьма малых их расходах и минимальных концентрациях.

Обычные ионообменные установки выдают сточные воды после регенерации периодически большими объёмами, что усложняет их обезвреживание. Стоки установок непрерывного процесса ионного обмена

характеризуются постоянным малым расходом, что облегчает и удешевляет их обезвреживающую обработку.

Расход реагентов на регенерацию ионитов в противоточных фильтрах непрерывного действия составляет 1,6–1,8 раз от стехиометрического количества, выраженного в кг.

Технико-экономические расчёты показывают, что по сравнению с установками с неподвижным слоем ионитов фильтры для непрерывного противоточного процесса ионного обмена дают экономию капитальных затрат от 20 до 40 % и эксплуатационных расходов на реагенты – от 25 до 40 %. Снижение эксплуатационных расходов обусловлено применением принципа противотока, а снижение капитальных затрат – высокими скоростями фильтрования (до 75 м/ч). Предельная скорость лимитируется истиранием ионитов. Хотя в установках непрерывного процесса ионного обмена возможна более высокая степень истирания ионитов, чем в установках с неподвижным слоем последних, но это окупается уменьшенным количеством ионитов в системе, в результате чего общие затраты на замену ионитов получаются такими же, как на обычных установках, или даже меньшими.

### **6.8. Сравнительная характеристика ФСДВР и ФСДНР**

Для глубокого обессоливания и обескремнивания добавочной питательной воды, вырабатываемой в относительно небольших количествах (60–300 м<sup>3</sup>/ч), применяются фильтры ФСДВР. ФСДНР применяют для очистки турбинных конденсатов в схемах конденсатоочистки блочных обессоливающих установок (БОУ). ФСДНР фильтры требуют обязательного сооружения специальной системы для регенерации отработанной смешанной шихты.

Наличие готовой загрузки отрегенированных ионитов в запасном бункере значительно сокращает продолжительность вывода ионитных фильтров на регенерацию. В то время, как при внутренней регенерации ФСД выводятся из работы на 4–5 ч, при внешней регенерации истощенные иониты заменяются путем гидроперегрузки заранее отрегенированной смесью катионитов и анионитов в течение не более 1 ч, что увеличивает долю рабочего времени ФСД, кроме того, упрощает конструкцию внутренних устройств и наружных коммуникаций на фронте этих фильтров и тем облегчает обслуживание и ремонт аппаратуры и повышает степень её готовности. Применение внешней регенерации исключает возможность попадания регенерационных растворов кислот и щелочей в конденсат,

сокращает количество арматуры, устраняет надобность в кислотоскойких материалах и покрытиях для рабочих фильтров, упрощает конструкцию последних, даёт возможность повысить скорость фильтрования конденсатов до 115 м/ч, снижает потребность в контрольно-измерительной аппаратуре.

### **6.9. Наладка и эксплуатация установок ионитной очистки воды**

До начала наладки ионитной очистки воды рекомендуется: выполнить полный анализ исходной воды, определить в лабораторных условиях рабочие ёмкости запланированных к применению ионитов, как по их техническим условиям, так и для реальной исходной воды; на основании результатов анализа исходной воды и лабораторных испытаний ионитов провести проверочный расчёт ионитной установки; составить график химического и технологического контроля установки; составить общую технологическую схему установки и её отдельных узлов; подготовить временную инструкцию для эксплуатационного персонала по обслуживанию установки.

В период наладки должны быть проверены следующие технологические показатели: установлен рациональный режим регенерации ионитных фильтров; определён оптимальный удельный расход реагентов на регенерацию ионитов; определена рабочая ёмкость поглощения ионитов и зависимость её от удельных расходов реагентов на регенерацию; уточнён расход воды на собственные нужды ионитной установки; установлено качество обессоленной воды и его изменение в зависимости от режима ионитных фильтров; проверен оптимальный вариант схемы ступенчатой и индивидуальной регенерации фильтров; проверен и налажен режим нейтрализации регенерационных стоков.

В процессе монтажа ионитных фильтров рекомендуется проследить за вертикальностью установки фильтров (по отвесу); проконтролировать гидравлическое испытание запорной арматуры до её установки в схему; провести опрессовку фильтра и трубопроводов перед выполнением антикоррозионных работ; проверить горизонтальность дренажных систем и качество сборки нижней системы до начала работ по антикоррозионной защите, а также и качество всех операций по антикоррозионной защите и технологии заливки нижнего днища бетоном.

Рекомендуется провести сравнение показателей работы всей установки в целом и отдельных её узлов в пусковой период с проектными и нормативными и только после достижения устойчивой работы всех узлов

и аппаратов приступить к установлению оптимального режима работы установки.

К таким показателям относятся: производительность установки, глубина обессоливания, потеря напора по ступеням очистки, колебания концентрации регенерационных растворов, вынос фильтрующих материалов. Необходимо проверить правильность показаний контрольно-измерительных приборов, работу насосов дозаторов и регуляторов. Если фактические данные для них значительно отклоняются от нормативных или проектных, то выявляют и устраняют причины отклонений.

Оптимальный режим работы ионитных фильтров устанавливают по расходу реагентов, концентрации регенерационных растворов, скорости взрыхления и отмывки путем изменения этих показателей на 50–100 % больше от номинальных или проектных. С целью достижения наименьших удельных расходов реагентов проверяют все возможные варианты схемы повторного использования отработавших регенерационных растворов. При этом расход воды на собственные нужды также должен быть сведен к минимуму.

При наладке декарбонизаторов и вакуумных деаэраторов оптимальным режимом считается тот, при котором достигается остаточное содержание углекислоты в воде не более 3–5 мг/дм<sup>3</sup>.

Правильность установленных при наладке оптимальных режимов контролируют и проверяют в процессе эксплуатации. Для этого ведут систематические наблюдения за целостью дренажных систем по выносу ионитов при фильтровании воды и состоянием слоя ионита в фильтре. Периодически раз в 6 мес. осматривают состояние фильтрующего материала, проверяют его высоту, состояние поверхности и наличие трещин у стенок. Последние свидетельствуют о пристенном эффекте в рабочем цикле фильтра. Для уменьшения и исключения этого эффекта скорость фильтрования не должна быть меньше 5 м/ч.

Показатели оптимального технологического режима работы ионитных фильтров приведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

## Показатели оптимального технологического режима работы ионитных фильтров

Операции и регламентирующий показатель	Н-катионирование				Анионирование		
	Предвключённая ступень	I ступень	II ступень	III ступень	I ступень	II ступень	III ступень
Марка ионита	Сульфоуголь	КУ-2	КУ-2	КУ-2	АН-31	АВ-17	АВ-17
Высота слоя ионита, м	2,5–3,0	2,0–2,5	1,5–1,8	1,2–1,5	2,0	1,5–1,8	1,2–1,5
Рабочий цикл фильтра (скорость фильтрования), м/ч	12–15	12–15	15–20	20–30	12–15	15–20	20–30
Отключение на регенерацию	Одновременно с первой ступенью	Снижение кислотности на 0,2–0,3 мг-экв/дм <sup>3</sup>	По количеству обработанной воды	Содержание Cl не более 5 мг/дм <sup>3</sup>	Содержание в фильтрате SiO <sub>2</sub> не более 0,2 мг/дм <sup>3</sup>		Содержание в фильтрате SiO <sub>2</sub> не более 0,2 мг/дм <sup>3</sup>



В процессе ионитной очистки органические вещества, содержащиеся в воде, частично адсорбируются зёрнами сильноосновного анионита, а при регенерации не полностью вытесняются. Для удаления органических веществ из анионита на практике применяют промывки его раствором поваренной соли.

В связи с особенностями органических загрязнений каждого водоисточника режим обработки анионита в конкретных условиях следует уточнить лабораторными испытаниями. Для определения оптимальных условий обработки изменяют: концентрацию раствора соли и его расход, продолжительность выдержки и скорость фильтрования, температуру. Наиболее часто применяют метод обработки с применением 5–10 % щелочного раствора поваренной соли.

Во избежание выделения на зёрнах анионита кремниевой кислоты в виде трудно удаляемого осадка рекомендуется обработку анионита проводить после регенерации, расход щелочи на эту регенерацию должен составлять 50 % от номинального. Обработка проходит более эффективно при подогреве раствора соли до 40–45 °С, подогрев ведётся сетевой водой в теплообменнике. Обработку раствором поваренной соли ведут в два этапа. На первом этапе фильтр заполняют 10 %-ным раствором со скоростью 4–5 м/ч и ставят на выдержку на 5–6 ч. По окончании выдержки ведут отмывку до осветления отмывной воды. На втором этапе фильтр заполняют раствором, содержащим 4–5 % NaCl и 3 % NaOH, с той же скоростью и дают выдержку 5–7 ч. После отмывки проводят регенерацию удвоенным расходом NaOH от номинального.

Применение водных отмывок ионитов не обеспечивает полного удаления из фильтрующей загрузки всех загрязнений. Такие примеси, как оксиды и гидроксиды железа, прочно удерживаются поверхностью зёрен ионитов, накапливаются в фильтрующем слое, что приводит к снижению рабочей ёмкости ионитов и, как следствие, к увеличению расхода реагентов на обработку воды.

В последние годы на электростанциях находит применение новый эффективный метод ультразвуковой обработки ионитов и фильтрующих материалов.

Промышленная установка для такой обработки состоит из ультразвуковой камеры, соединённой с фильтрами трубопроводами или резиновыми шлангами. В камеру встроены магнитострикционные преобразователи ПМС-6-22, подсоединённые к генератору УЗГ-2-10. Генератор преобразует частоту электрической энергии до 220 кГц, а магнитострикционные преобразователи превращают электрическую

энергию в механическую той же частоты. Камера позволяет проводить очистку фильтрующего материала в тонком слое в процессе его гидроперегрузки. Она легко встраивается в схему гидроперегрузки любых фильтров. Наблюдение за ходом обработки материала ведут через смотровое окно из органического стекла в крышке камеры.

Для проведения очистки (рис. 6.3) один из штуцеров рабочей камеры соединяют с люком гидроперегрузки фильтра № 1, в котором находится загрязненный материал. Второй штуцер соединяют с люком гидроперегрузки фильтра № 2, куда направляют очищенный фильтрующий материал. Фильтры и рабочую камеру заполняют водой. За 15 мин до начала перегрузки включают ультразвуковой генератор, затем включают камеру и настраивают магнитострикционные преобразователи на резонансную частоту. Номинальные показатели приборов генератора должны иметь следующие значения: напряжение анода 8,0 кВ, напряжение выхода 450 В, ток анода 2,0 А, ток подмагничивания 30 А, ток сети генераторной лампы 450 мА.

При перегрузке фильтрующего материала устанавливают расход взрыхляющей воды 20–30 м<sup>3</sup>/ч. Продолжительность перегрузки и очистки 1 м<sup>3</sup> фильтрующего материала не превышает 5 мин.

Современные ионитные установки на ТЭС имеют цепочечную компоновку. В рабочем цикле все фильтры «цепочки» включаются одновременно. Перевод блока фильтров из режима «работа» в режим «восстановление» происходит по сигналу истощения анионитного фильтра первой ступени.

Объём ионитной загрузки всех других фильтров «цепочки» должен быть таким, чтобы обеспечивалось синхронное срабатывание их рабочей обменной ёмкости одновременно с анионитным фильтром I ступени. Для удаления из обрабатываемой воды угольной кислоты в схеме «цепочки» предусматривается установка декарбонизатора после анионитного фильтра I ступени. На установках с предварительной обработкой воды известкованием декарбонизатор может быть заменён дополнительной ступенью анионирования. Последняя ступень очистки может выполняться в ФСД.

Результаты сравнительных технологических расчётов ионитных установок по схемам «цепочки» и параллельного включения фильтров, выполненных Харьковским отделением АТЭП, свидетельствуют о несомненном преимуществе цепочечной схемы по количеству рабочих фильтров, потребности в анионитах, расходу реагентов и расходу воды на собственные нужды.

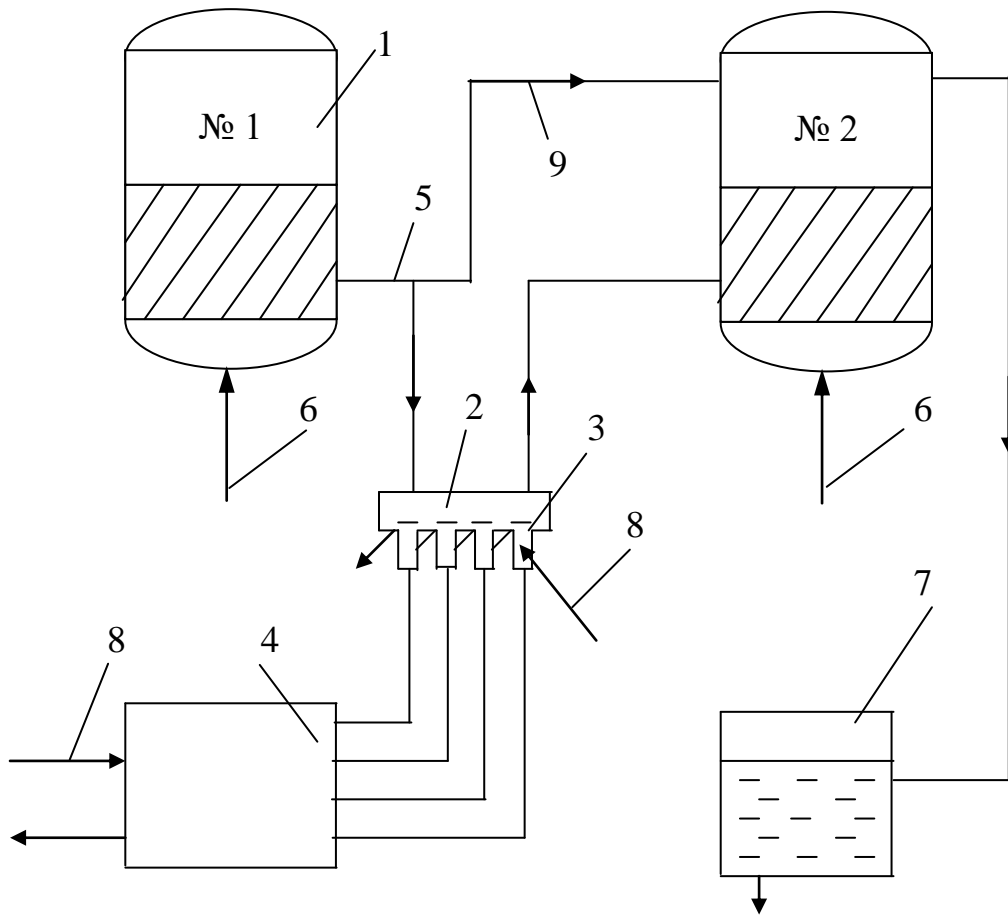


Рис. 6.3. Принципиальная технологическая схема ультразвуковой очистки фильтрующих материалов в тонком слое: 1 – фильтры; 2 – рабочая камера; 3 – магнетострикционные преобразователи; 4 – генератор; 5 – пульпа; 6 – вода для взрыхления и гидроразгрузки; 7 – ёмкость для отстаивания; 8 – охлаждающая вода; 9 – схема гидроразгрузки

### 6.10. Реагентное хозяйство ионитных установок

В состав кислотного и щелочного реагентного хозяйства входят: баки для хранения концентрированных растворов кислоты и щелочи, цистерны для разгрузки, мерники для подачи реагентов на регенерацию, вакуум-насосы для создания разрежения в системе трубопроводов слива кислоты и щелочи из железнодорожных цистерн, насосы-дозаторы для подачи реагентов на регенерацию.

Ёмкость баков хранения кислоты и щелочи должна обеспечивать хранение не менее чем месячного запаса каждого реагента. Допускается в районах с умеренным климатом размещение баков кислоты на открытом воздухе. Баки хранения щелочи должны находиться в отапливаемом помещении.

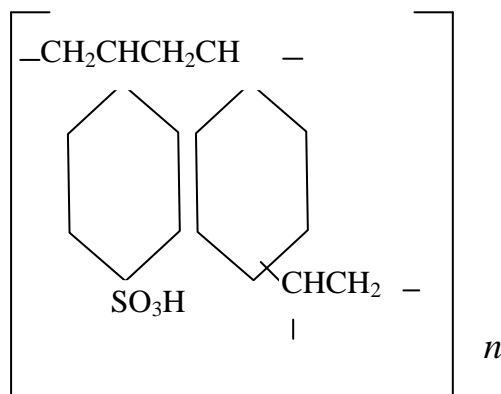
Ёмкость складских цистерн обычно не более  $15 \text{ м}^3$  для каждого реагента. В процессе разгрузки из железнодорожных цистерн заполнение складских цистерн ведут созданием в них разрежения с помощью вакуум-насоса или эжектора.

Кислоту и щелочь из складских цистерн транспортируют в баки хранения с применением вакуумной схемы или сжатого воздуха. Складские цистерны из баков хранения заполняют по вакуумной схеме. В цистерне создают вакуум, заполняют сифон, соединяющий бак с цистерной, и контролируют уровень заполнения. По условиям безопасности обслуживания баки и цистерны для хранения кислоты не должны иметь нижних сливных трубопроводов. Мерники кислоты и щелочи должны обеспечивать хранение 2–3 суточного запаса реагентов для регенерации ионитных фильтров. Баки хранения, цистерны и мерники реагентов должны быть оборудованы манометрами, вакуумметрами и устройствами для измерения уровня. В связи с высокой агрессивностью серной кислоты затруднения при поисках надёжных конструктивных датчиков для измерения уровня в ёмкостях хранения и расхода были решены применением радиоизотопных уровнемеров УР-8М, поставляемых фирмой «Изотоп».

## 6.11. Иониты

### 6.11.1. Промышленные катиониты

Сильнокислотный катионит КУ-2-8 (ГОСТ 20298-74) получают сульфированием сополимера стирола с 8 % дивинилбензола, он имеет гелевую структуру, монофункционален:

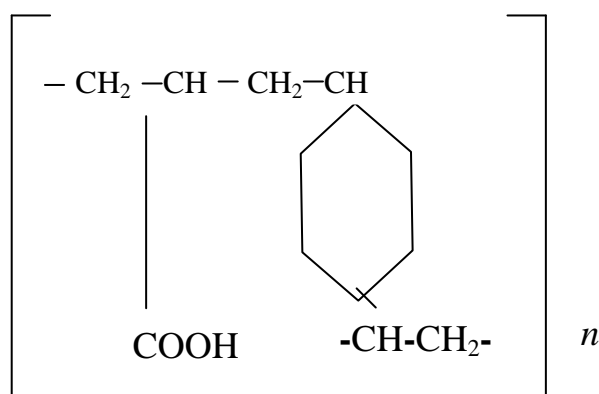


Катионит отличается высокой химической стойкостью в разбавленных растворах щелочей, кислот, некоторых окислителей и органических растворителей. Катионит может работать при температуре до 110–120 °С [1].

Сильнокислотный катионит КУ-2-8чС (ГОСТ 20298-74) отличается от катионита КУ-2 особой чистотой, применяется главным образом в условиях АЭС.

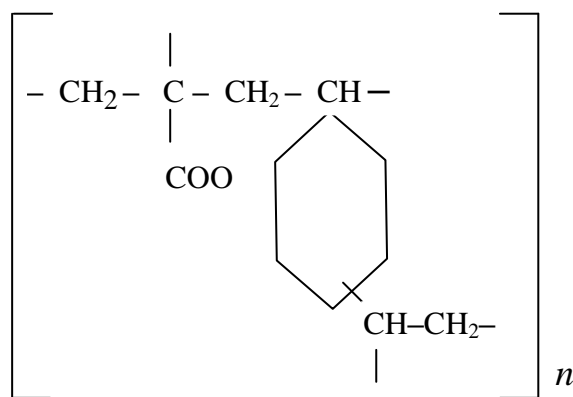
Сильнокислотный катионит КУ-23 (ГОСТ 20298-74) получают сульфированием макропористого сополимера стирола и дивинилбензола, он имеет макропористую структуру.

Слабокислотный катионит КБ-2 получают сополимеризацией метакрилата (метилового эфира акриловой кислоты  $\text{CH}_2 = (\text{CH}-\text{COOCH}_3)$ ) с дивинилбензолом, которого берут в количестве 2–3 % метакрилата. Готовый сополимер подвергают омылению, при котором эфирные группы превращаются в кислотные. Катионит имеет гелевую структуру и монофункционален:



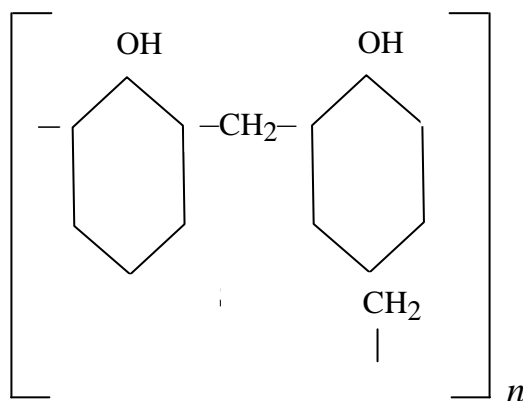
Слабокислотные катиониты КБ-2-7П и КБ-2-10П – химические аналоги катионита КБ-2, отличающиеся от него тем, что при их синтезе используется 7 или 10 % ДВБ и 30 % порообразователя изооктана.

Слабокислотный катионит КБ-4 (ГОСТ 20298-74) получают сополимеризацией метилметакрилата ([метилового эфира метакриловой кислоты:  $\text{CH}_2[\text{C}(\text{CH}_3)-\text{COOCH}_3]$ ) с 6 % дивинилбензола и последующим переводом эфирных групп в карбоксильные. Катионит имеет гелевую структуру, монофункционален:



Слабокислотный катионит КБ-4-10П – химический аналог катионита КБ-4, отличающийся от него макропористой структурой. Он получается из тех же процентных соотношений ДВБ и порообразователя, что и катионит КБ-2-10П.

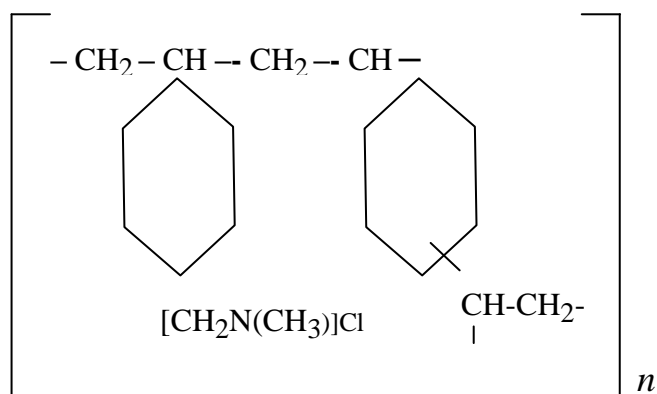
Слабокислотный катионит КУ-1 (ГОСТ 20298-74) получается поликондесацией сульфированного фенола в кислой среде с формальдегидом. Катионит бифункционален, содержит фенольные группы и сульфогруппы:



Катионит сульфоуголь (СУ) получают путем смешения олеума с дроблёным каменным углем при температуре 110–140 °С. Катионит СУ полифункционален, содержит сульфогруппы, карбоксильные и фенольные группы. По сравнению с синтетическими катионитами сульфоуголь имеет менее определенный и менее однородный состав, благодаря чему понятие о строении его элементарной ячейки теряет смысл. Он менее химически и механически стоек, однако он достаточно дешев, благодаря чему нашел широкое применение в установках подготовки воды для ТЭС и АЭС.

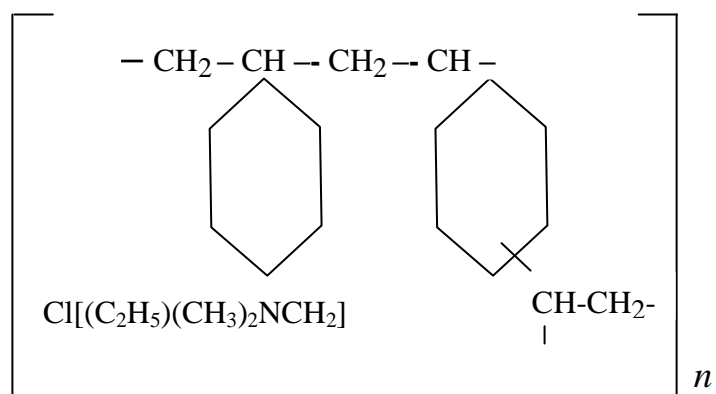
### 6.11.2. Промышленные аниониты

Сильноосновной анионит АВ-17-8 (ГОСТ 20301-74) получают хлорметилением сополимера стирола и дивинилбензола (8 %) с последующим аминированием хлорметильной группы. Анионит монофункциональный, имеет группировку четырехзамещенного аммониевого основания:

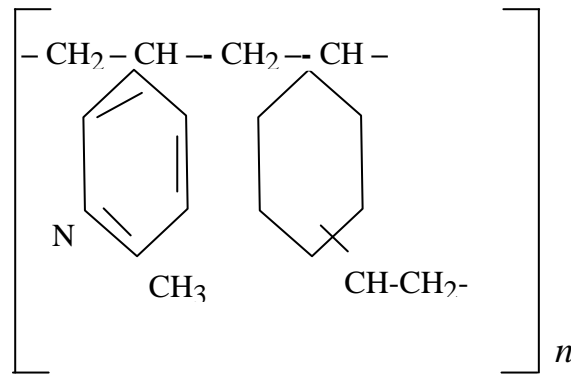


Сильноосновной анионит АВ-17-8чС (ГОСТ 20301-74) является аналогом анионита АВ-17-8 и отличается от него особой чистотой.

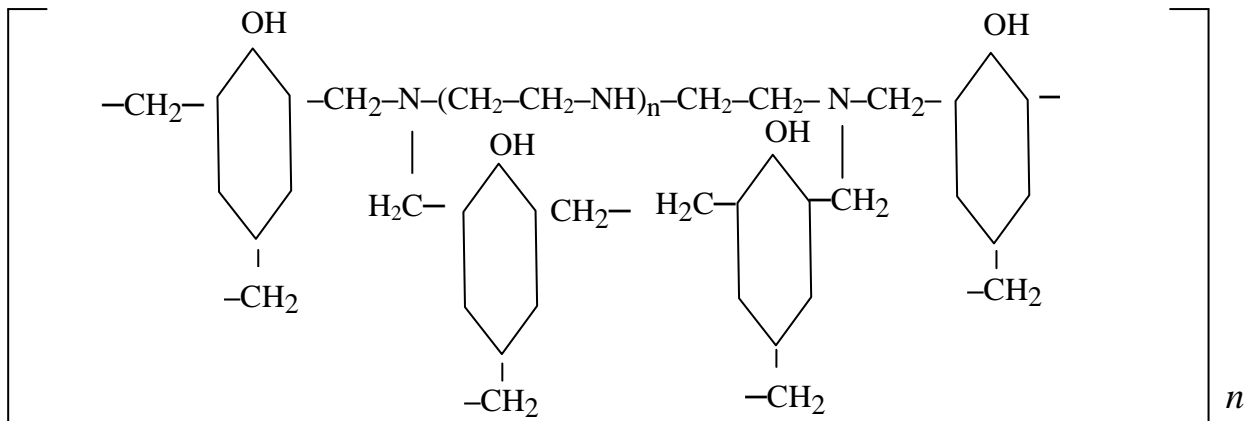
Сильноосновной анионит АВ-29-12П (ГОСТ 20301-74) получают сополимеризацией стирола и дивинилбензола в присутствии порообразователя с последующим введением группировки четвертичного аммониевого основания путем обработки хлорметиленного сополимера диметиэтаноломином. Анионит имеет макропористую структуру, монофункционален:



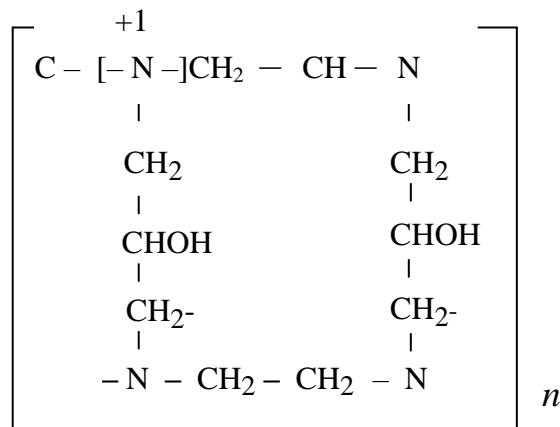
Сильноосновной анионит АН-251 (ТУ 6-05-211-785-72) получают сополимеризацией 2-метил-5-винилпиридина с дивинилбензолом в присутствии инертного порообразователя. Имеет макропористую структуру, монофункционален:



Слабокислотный анионит АН-2Ф (ГОСТ 20301-74) получается поликонденсацией фенола, формальдегида и полиэтиленполиамина в кислой среде. Является полифункциональным анионитом, содержит вторичные и третичные аминогруппы:

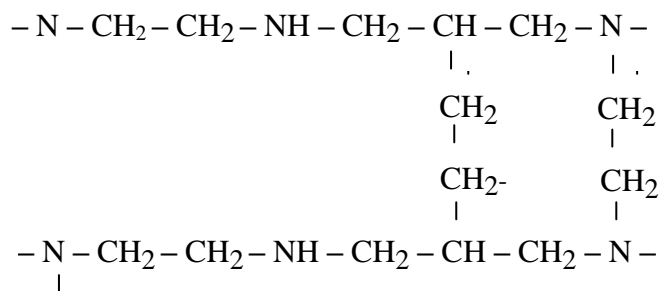


Анионит ЭДЭ-10П (ГОСТ 20301-74) получают поликонденсацией эпихлоргидрина и полиэтиленполиамина. Анионит полифункционален, в качестве функциональных групп имеет группировки вторичных и третичных аминов. Есть также примерно 20 % сильноосновных группировок четвертичного аммониевого основания:





Слабоосновный анионит АН-31 (ГОСТ 20303-74) получают поликонденсацией эпихлоргидрина и полиэтиленполиамина в присутствии аммиака. Анионит полифункционален, имеет группировки вторичных и третичных аминов [1]:



### Контрольные вопросы к главе 6

1. Дайте определение иониты, перечислите способы его получения.
2. Приведите реакции ионного обмена на ступенях Н(I), Н(II), Н(III).
3. Приведите реакции ионного обмена на ступенях А(I), А(II), А(III).
4. Опишите кинетику и механизм Н-катионирования.
5. Опишите кинетику и механизм ОН-анионирования.
6. Опишите устройство и работу фильтра смешанного действия.
7. Сравните устройство и работу фильтров смешанного действия с внутренней и внешней регенерации.
8. Нарисуйте типы регенерации ионитных фильтров.
9. Зарисуйте технологические схемы очистки турбинного и производственного конденсата на ТЭС и объясните принцип их работы.
10. Охарактеризуйте реагентное хозяйство ионитных установок.
11. Назовите технологические характеристики ионитов.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В условиях высокой единичной мощности агрегатов ТЭС, повышенных удельных тепловых нагрузок и роста требований к надёжной и безопасной работе оборудования все большую значимость продолжают приобретать проблемы подготовки воды надлежащего качества и высокоэффективной очистки конденсатов различных типов. При этом внедрение в практику эксплуатации мощных энергоблоков с использованием новых водно-химических режимов и углубленное изучение поведения примесей пара в турбоустановках, требования к качеству питательной воды и соответственно к качеству турбинного конденсата, добавочной питательной воды должны быть реализованы на фоне повышения качества работы оборудования водоочистки при сокращении объёмов вредных стоков от ВПУ. При проектировании и эксплуатации водоподготовительных установок необходимо решать инженерно-оптимизационные задачи при выборе оборудования и схем, технологических режимов. Решение этих задач определяется большим числом исходных и конечных параметров, таких как различное качество исходной воды, требования к качеству конечного продукта, малосточность установок, экономические и надёжностные показатели.

## ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОЧИСТКА ВОДЫ

Показатели качества исходной воды

Исходной водой является вода поверхностного источника – реки Северная Двина города Архангельска. Показатели качества воды представлены в табл. 1.

Таблица 1

Показатели качества исходной воды

Химический состав	Содержание		
	мг/дм <sup>3</sup>	мг-экв/дм <sup>3</sup>	моль/дм <sup>3</sup> 10 <sup>-3</sup>
Ca <sup>2+</sup>	102	5,090	2,545
Mg <sup>2+</sup>	16,8	1,382	0,691
Na <sup>+</sup>	6,9	0,300	0,300
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	264	4,328	4,328
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	112,8	2,350	1,175
Cl <sup>-</sup>	7,1	0,200	0,200
SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	10,2	–	–
Окисляемость (O <sub>к</sub> ), мг O <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	8,5	–	–
Солесодержание	509,6	–	–
Общая жесткость (Ж <sub>о</sub> )	–	6,472	–
Щелочность карбонатная (Щ <sub>к</sub> )	–	4,331	–
Щелочность некарбонатная (Щ <sub>нк</sub> )	–	2,14	–
Щелочность общая (Щ <sub>к</sub> )	–	4,33	–

### Физико-химический расчет предочистки

1. Проверка электронейтральность исходной воды:

$$\sum Kt = \sum An \text{ (мг-экв/дм}^3\text{)},$$

$$\sum Kt = C_{Na^+} + C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}},$$

$$\sum Kt = 0,3 + 5,090 + 1,382 = 6,772 \text{ мг-экв/дм}^3.$$

$$\sum An = C_{HCO_3^-} + C_{SO_4^{2-}} + C_{Cl^-},$$

$$\sum An = 4,328 + 2,35 + 0,2 = 6,878 \text{ мг-экв/дм}^3.$$

Ошибка электронейтральности определяется по формуле:

$$\Delta = \left| \frac{\sum Kt - \sum An}{\sum Kt + \sum An} \right| \cdot 100 \% = \left| \frac{6,771 - 6,878}{6,771 + 6,878} \right| \cdot 100 \% = 0,776 \% < 1.$$

Так как ошибка электронейтральности составила менее  $< 1 \%$ , следовательно, анализ исходной воды и расчёты выполнены правильно.

2. Ионная сила исходной воды:

$$\mu = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n C_i \cdot z_i^2,$$

где  $C_i$  – концентрация  $i$ -го иона, моль/л;  $z_i$  – заряд  $i$ -го иона.

$$\mu = \frac{1}{2} \left( C_{Na^+} \cdot z^2 + C_{Ca^{2+}} \cdot z^2 + C_{Mg^{2+}} \cdot z^2 + C_{HCO_3^-} \cdot z^2 + C_{SO_4^{2-}} \cdot z^2 + C_{Cl^-} \cdot z^2 \right) \cdot 10^{-3}$$

$$\mu = \frac{1}{2} \cdot 10^{-3} (0,3 \cdot 1 + 2,545 \cdot 4 + 0,691 \cdot 4 + 4,328 \cdot 1 + 1,175 \cdot 4 + 0,2 \cdot 1) =$$

$$= 11,236 \cdot 10^{-3} \text{ моль/дм}^3.$$

3. Коэффициенты активности:

$$\lg f = \frac{-0,5 \cdot z^2 \sqrt{\mu}}{1 + \sqrt{\mu}};$$

для однозарядных ионов:

$$\lg f_1 = \frac{-0,5 \cdot 1^2 \cdot \sqrt{11,237 \cdot 10^{-3}}}{1 + \sqrt{11,237 \cdot 10^{-3}}} = -0,048,$$

$$f_1 = 10^{-0,048} = 0,89;$$

для двухзарядных ионов:

$$\lg f_2 = -\frac{0,5 \cdot 2^2 \cdot \sqrt{11,237 \cdot 10^{-3}}}{1 + \sqrt{11,237 \cdot 10^{-3}}} = -0,19,$$

$$f_2 = 10^{-0,19} = 0,643;$$

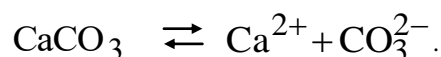
для трёхзарядных ионов:

$$\lg f_3 = -\frac{0,5 \cdot 3^2 \cdot \sqrt{11,237 \cdot 10^{-3}}}{1 + \sqrt{11,237 \cdot 10^{-3}}} = -0,431,$$

$$f_3 = 10^{-0,431} = 0,37.$$

4. Определяем равновесная концентрация  $\text{CO}_3^{2-}$ .

На стадии предочистки происходит известкование воды для этого добавляется 8 % раствор  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  – известкового молока. В результате на дно осветлителя осаждается шлам. В состав шлама входит  $\text{CaCO}_3$ , поэтому для исходной воды в осветлителе характерно равновесие:



$$\text{Пр}_{\text{CaCO}_3} = a_{\text{Ca}^{2+}} \cdot a_{\text{CO}_3^{2-}} = f_2 \cdot C_{\text{Ca}^{2+}} \cdot f_2 \cdot C_{\text{CO}_3^{2-}} = 4,8 \cdot 10^{-9},$$

величина  $\text{Пр}_{\text{CaCO}_3} = 4,8 \cdot 10^{-9}$  находится по справочнику при  $t = 25$  °С,

$$C_{\text{CO}_3^{2-}} = \frac{\text{Пр}_{\text{CaCO}_3}}{f_2^2 \cdot C_{\text{Ca}^{2+}}},$$

$$C_{\text{CO}_3^{2-}} = \frac{4,8 \cdot 10^{-9}}{0,643^2 \cdot 2,545 \cdot 10^{-3}} = 4,562 \cdot 10^{-6} \text{ моль/дм}^3.$$

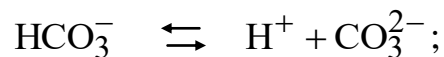
5. Концентрация свободной угольной углекислоты:

$$C_{\text{CO}_2} = C_{\text{H}_2\text{CO}_3} = \frac{K_{\text{H}_2\text{CO}_3}^{\text{II}} \cdot C_{\text{Ca}^{2+}} \cdot C_{\text{HCO}_3^-}^2 \cdot f_1^2 \cdot f_2}{K_{\text{H}_2\text{CO}_3}^{\text{I}} \cdot \text{Пр}_{\text{CaCO}_3}},$$

где  $K_{\text{H}_2\text{CO}_3}^{\text{I}}$ ,  $K_{\text{H}_2\text{CO}_3}^{\text{II}}$  – константа диссоциации угольной кислоты соответственно по первой и второй ступени;



$$K_{\text{I}}$$

$$K_{\text{II}}$$


$$K_{\text{H}_2\text{CO}_3}^{\text{I}} = 5,06 \cdot 10^{-7};$$

$$K_{\text{H}_2\text{CO}_3}^{\text{II}} = 5,65 \cdot 10^{-11};$$

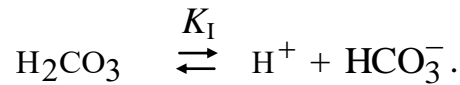
$$C_{\text{H}_2\text{CO}_3} = \frac{f_1^2 \cdot C_{\text{HCO}_3^-}^2 \cdot K_{\text{II}} \cdot f_2 \cdot C_{\text{Ca}^{2+}}}{K_{\text{I}} \cdot \text{Пр}_{\text{CaCO}_3}},$$

$$C_{\text{CO}_2} = C_{\text{H}_2\text{CO}_3} = \frac{0,89^2 \cdot (4,328 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 5,65 \cdot 10^{-11} \cdot 0,643 \cdot 2,545 \cdot 10^{-3}}{5,06 \cdot 10^{-7} \cdot 4,8 \cdot 10^{-9}} =$$

$$= 5,648 \cdot 10^{-4} \text{ моль/дм}^3 = 1,130 \text{ мг-экв/дм}^3.$$

6. pH исходной воды.

Для определения pH исходной воды используют уравнение диссоциации  $\text{H}_2\text{CO}_3$  по I ступени:



$$K_{\text{H}_2\text{CO}_3}^{\text{I}} = \frac{a_{\text{H}^+} \cdot a_{\text{HCO}_3^-}}{a_{\text{H}_2\text{CO}_3}} = \frac{f_1 \cdot C_{\text{H}^+} \cdot f_1 \cdot C_{\text{HCO}_3^-}}{C_{\text{H}_2\text{CO}_3}},$$

$$C_{\text{H}^+} = \frac{K_{\text{H}_2\text{CO}_3}^{\text{I}} \cdot C_{\text{H}_2\text{CO}_3}}{f_1^2 \cdot C_{\text{HCO}_3^-}} \Rightarrow a_{\text{H}^+} = C_{\text{H}^+} \cdot f_1,$$

$$\text{pH} = -\lg a_{\text{H}^+} = \lg C_{\text{HCO}_3^-} + \lg f_1 - \lg K_{\text{H}_2\text{CO}_3}^{\text{I}} - \lg C_{\text{H}_2\text{CO}_3},$$

$$\text{pH} = \lg(4,328 \cdot 10^{-3}) + 2 \lg(0,89) - \lg(5,06 \cdot 10^{-7}) - \lg(5,85 \cdot 10^{-4}) = 7,064.$$

7. Доза коагулянта.

Основными технологическими процессами предочистки являются коагуляция коллоидных примесей и известкование, которые обычно совмещаются одновременно в одном аппарате – осветлителе. Это проводят с целью улучшения, т.е. оптимизации суммарного технологического процесса и снижения денежных затрат. Коагуляцию проводят при 40 °С 8 %-ным раствором коагулянта. Коагулянтом служит  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .

В связи с тем, что показатели исходной воды средние, мы выбрали среднюю дозу коагулянта (табл. 2).

Таблица 2

Таблица выбора дозы коагулянта

Доза коагулянта $D_k$ , мг-экв/дм <sup>3</sup>	Общая щелочность $\text{Щ}_0$ , мг-экв/дм <sup>3</sup>	Окисляемость $O_k$ , мг $\text{O}_2$ /дм <sup>3</sup>
1	< 1,5	> 10,0
0,75	1,5–2,0	5,0–10,0
0,50	> 2,0	< 5

$O_k = 8,5 \text{ мг } O_2/\text{дм}^3$ , тогда  $D_k = 0,75 \text{ мг-экв}/\text{дм}^3$ .

Отсюда доза извести  $D_{и}$ :

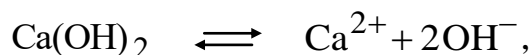
$$D_{и} = C_{CO_2}^{исх} + C_{HCO_3^-}^{исх} + \Delta C_{Mg^{2+}} + d_{изв} + D_k,$$

где  $d_{изв} = 0,2 \text{ мг-экв}/\text{дм}^3$  – избыток извести,

$$D_{и} = 1,130 + 4,328 + 0,816 + 0,2 + 0,75 = 7,25 \text{ мг-экв}/\text{дм}^3.$$

8. Концентрация гидроксил-ионов  $OH^-$ , протона  $H^+$  и рН обработанной воды.

В исходную воду при известковании добавляем 8 %  $Ca(OH)_2$ .  $Ca(OH)_2$  – сильное основание, значит рН воды увеличивается, концентрация  $OH^-$  определяется избытком извести  $d_{изв}$ .



$$C_{OH^-} = d_{изв} = 0,2 \text{ мг-экв}/\text{дм}^3 = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ моль}/\text{дм}^3,$$

$$a_{OH^-} = f_1 \cdot C_{OH^-} = 0,899 \cdot 0,2 = 0,178 \text{ мг-экв}/\text{дм}^3 = 1,78 \cdot 10^{-4} \text{ моль}/\text{дм}^3.$$

Концентрацию  $H^+$  находим из ионного произведения воды.

$$I_{H_2O} = a_{H^+} \cdot a_{OH^-} = 10^{-14},$$

$$a_{H^+} = \frac{I_{H_2O}}{a_{OH^-}} = \frac{10^{-14}}{1,78 \cdot 10^{-4}} = 5,618 \cdot 10^{-11} \text{ моль}/\text{дм}^3,$$

$$pH = -\lg a_{H^+} = \lg(5,618 \cdot 10^{-11}) = 10,25,$$

$$C_{H^+} = \frac{a_{H^+}}{f_1} = \frac{5,618 \cdot 10^{-11}}{0,89} = 6,312 \cdot 10^{-11} \text{ моль}/\text{дм}^3 = 6,312 \cdot 10^{-8} \text{ мг-экв}/\text{дм}^3.$$



9. Концентрация сульфат-аниона ( $\text{SO}_4^{2-}$ ).

Поскольку в воду добавляем 8 % раствор  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , то концентрация сульфат-иона в воде увеличивается на величину дозы  $D_K$ .

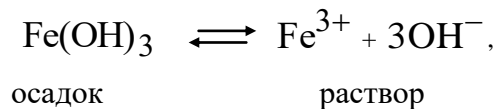
$$C_{\text{SO}_4^{2-}}^{\text{кон}} = C_{\text{SO}_4^{2-}}^{\text{исх}} + D_K = 2,35 + 0,75 = 3,10 \text{ мг-экв/дм}^3 = 1,55 \cdot 10^{-3} \text{ моль/дм}^3.$$

Концентрация ионов  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$  на стадии предочистки не изменяется.

Содержание кремнекислоты  $\text{H}_2\text{SiO}_3$  уменьшается на 40 %.

$$C_{\text{H}_2\text{SiO}_3}^{\text{кон}} = 0,6 \cdot C_{\text{H}_2\text{SiO}_3}^{\text{исх}} = 0,6 \cdot 10,2 = 6,12 \text{ мг/дм}^3.$$

10. В результате коагуляции на дно осветлителя оседает шлам. Продуктом коагуляции является гидроксид железа  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ :

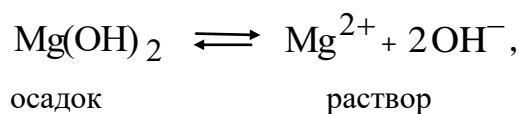


$$\text{ПР}_{\text{Fe}(\text{OH})_3} = a_{\text{Fe}^{3+}} \cdot a_{\text{OH}^-}^3 = 3,8 \cdot 10^{-38}, t = 25 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$a_{\text{Fe}^{3+}} = \frac{\text{ПР}_{\text{Fe}(\text{OH})_3}}{a_{\text{OH}^-}^3} = \frac{3,8 \cdot 10^{-38}}{(1,78 \cdot 10^{-4})^3} = 6,738 \cdot 10^{-27} \text{ моль/дм}^3,$$

$$C_{\text{Fe}^{3+}} = \frac{a_{\text{Fe}^{3+}}}{f_3} = \frac{6,738 \cdot 10^{-27}}{0,37} = 1,821 \cdot 10^{-26} \text{ моль/дм}^3.$$

11. В результате известкования катиона  $\text{Mg}^{2+}$  образуется осадок  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , который выпадает на дно осветлителя в виде шлама:



$$\text{ПР}_{\text{Mg}(\text{OH})_2} = a_{\text{Mg}^{2+}} \cdot a_{\text{OH}^-}^2 = 5,5 \cdot 10^{-12}, t = 25 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$a_{\text{Mg}^{2+}} = \frac{\text{PP}_{\text{Mg}(\text{OH})_2}}{a_{\text{OH}^-}^2} = \frac{5,5 \cdot 10^{-12}}{(1,78 \cdot 10^{-4})^2} = 1,736 \cdot 10^{-4} \text{ моль/дм}^3,$$

$$C_{\text{Mg}^{2+}}^{\text{кон}} = \frac{a_{\text{Mg}^{2+}}}{f_2} = \frac{1,736 \cdot 10^{-4}}{0,643} = 2,700 \cdot 10^{-4} \text{ моль/дм}^3 = 0,540 \text{ мг-экв/дм}^3.$$

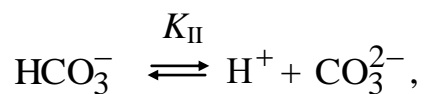
Определяется избыток  $\Delta C_{\text{Mg}^{2+}}$ . Для этого необходимо выбрать минимальное значение концентрации:

$$\begin{aligned} C_{\text{Mg}^{2+}}^{\text{кон}} &= \min (C_{\text{Mg}^{2+}}^{\text{исх}}; C_{\text{Mg}^{2+}}^{\text{кон}}) = \\ &= \min (0,691 \cdot 10^{-3} \text{ моль/дм}^3; 0,283 \cdot 10^{-3} \text{ моль/дм}^3) = 0,270 \cdot 10^{-3} \text{ моль/дм}^3 = \\ &= 2,83 \cdot 10^{-4} \text{ мг-экв/дм}^3. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta C_{\text{Mg}^{2+}} &= C_{\text{Mg}^{2+}}^{\text{исх}} - C_{\text{Mg}^{2+}}^{\text{кон}} = 0,691 \cdot 10^{-3} - 0,270 \cdot 10^{-3} = \\ &= 0,421 \cdot 10^{-3} \text{ моль/дм}^3 = 0,842 \text{ мг-экв/дм}^3. \end{aligned}$$

## 12. Концентрация $\text{HCO}_3^-$ .

Для нахождения этой концентрации используется уравнение диссоциации угольной кислоты по 2-ой ступени.



$$K_{\text{II}} = \frac{a_{\text{H}^+} \cdot a_{\text{CO}_3^{2-}}}{a_{\text{HCO}_3^-}} = \frac{f_1 \cdot C_{\text{H}^+} \cdot f_2 \cdot C_{\text{CO}_3^{2-}}}{f_1 \cdot C_{\text{HCO}_3^-}},$$

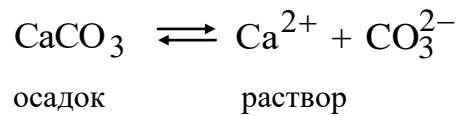
$$K_{\text{II}} = 5,61 \cdot 10^{-11}, t = 25 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$a_{\text{H}^+} = C_{\text{H}^+} \cdot f_1; a_{\text{CO}_3^{2-}} = C_{\text{CO}_3^{2-}} \cdot f_2; a_{\text{HCO}_3^-} = C_{\text{HCO}_3^-} \cdot f_1,$$

Пусть концентрация  $C_{\text{HCO}_3^-} = x$  моль/дм<sup>3</sup> = 1000· $x$  мг-экв/дм<sup>3</sup>,

$$\text{тогда } C_{\text{CO}_3^{2-}} = \frac{5,61 \cdot 10^{-11} \cdot x}{6,312 \cdot 10^{-11} \cdot 0,643} = 1,382 \cdot x \text{ моль/дм}^3.$$

Рассчитывается концентрация  $\text{Ca}^{2+}$  конечного раствора с учётом его осаждения в форме  $\text{CaCO}_3$ :



$$\text{ПР}_{\text{CaCO}_3} = a_{\text{Ca}^{2+}} \cdot a_{\text{CO}_3^{2-}} = 4,8 \cdot 10^{-9}, t = 25 \text{ }^\circ\text{C},$$

$$\begin{aligned} a_{\text{Ca}^{2+}} &= \frac{\text{ПР}_{\text{CaCO}_3}}{a_{\text{CO}_3^{2-}}} = \frac{\text{ПР}_{\text{CaCO}_3}}{C_{\text{CO}_3^{2-}} \cdot f_2} = \frac{4,8 \cdot 10^{-9}}{1,382 \cdot x \cdot 0,643} = \frac{5,402 \cdot 10^{-9}}{x} \text{ моль/дм}^3 = \\ &= \frac{1,080 \cdot 10^{-5}}{x} \text{ мг-экв/дм}^3. \end{aligned}$$

$$C_{\text{Ca}^{2+}} = \frac{a_{\text{Ca}^{2+}}}{f_2} = \frac{1,080 \cdot 10^{-5}}{x \cdot 0,643} = \frac{1,680 \cdot 10^{-5}}{x} \text{ мг-экв/дм}^3.$$

Чтобы найти концентрацию  $\text{HCO}_3^-$ , составляем уравнение электронейтральности конечного раствора.

Уравнение электронейтральности:

$$\sum \text{Kt}^{\text{кон}} = \sum \text{An}^{\text{кон}}.$$

$$C_{\text{H}^+}^{\text{кон}} + C_{\text{Ca}^{2+}}^{\text{кон}} + C_{\text{Mg}^{2+}}^{\text{кон}} + C_{\text{Na}^+}^{\text{кон}} = C_{\text{HCO}_3^-}^{\text{кон}} + C_{\text{SO}_4^{2-}}^{\text{кон}} + C_{\text{Cl}^-}^{\text{кон}} + C_{\text{CO}_3^{2-}}^{\text{кон}} + C_{\text{OH}^-}^{\text{кон}}.$$

Концентрация катионов, мг-экв/дм <sup>3</sup>	Концентрация анионов, мг-экв/дм <sup>3</sup>
$C_{Ca^{2+}}^{кон} = \frac{1,680 \cdot 10^{-5}}{x}$	$C_{SO_4^{2-}}^{кон} = 3,1$
$C_{Mg^{2+}}^{кон} = 0,540$	$C_{OH^-}^{кон} = 0,2$
$C_{Na^+}^{кон} = 0,3$	$C_{Cl^-}^{кон} = 0,2$
$C_{H^+}^{кон} = 6,312 \cdot 10^{-3}$	$C_{HCO_3^-}^{кон} = 1000 \cdot x$
	$C_{CO_3^{2-}}^{кон} = 1,382 \cdot 2 \cdot 1000 \cdot x = 2764 \cdot x$

$$\frac{1,680 \cdot 10^{-5}}{x} + 0,540 + 0,3 + 6,312 \cdot 10^{-3} = 1000 \cdot x + 3,1 + 0,2 + 0,2 + 2764 \cdot x,$$

$$3764 \cdot x^2 + 2,66 \cdot x - 1,680 \cdot 10^{-5} = 0,$$

$$D = 7,097 + 0,255 = 7,352 > 0,$$

$$x = C_{HCO_3^-} = \frac{-2,660 + 2,707}{2 \cdot 3764} = \frac{0,047}{7560} = 6,243 \cdot 10^{-6} \text{ моль/дм}^3 =$$

$$= 6,243 \cdot 10^{-3} \text{ мг-экв/дм}^3,$$

$$C_{Ca^{2+}}^{кон} = \frac{1,680 \cdot 10^{-5}}{6,243 \cdot 10^{-6}} = 2,691 \text{ мг-экв/дм}^3 = 1,346 \cdot 10^{-3} \text{ моль/дм}^3,$$

$$C_{CO_3^{2-}}^{кон} = 1,382 \cdot 2000 \cdot 6,243 \cdot 10^{-6} = 0,01726 \text{ мг-экв/дм}^3 = 8,628 \cdot 10^{-6} \text{ моль/дм}^3.$$

Правильность нахождения концентраций проверяется по квадратному уравнению через уравнение электронейтральности:

$$\sum Kt = \sum An,$$

$$\sum Kt = C_{Na^+} + C_{Ca^{2+}} + C_{Mg^{2+}} = 0,3 + 2,697 + 0,540 = 3,531 \text{ мг-экв/дм}^3,$$

$$\begin{aligned} \sum An = C_{\text{HCO}_3^-} + C_{\text{SO}_4^{2-}} + C_{\text{Cl}^-} + C_{\text{OH}^-} + C_{\text{CO}_3^{2-}} &= 6,243 \cdot 10^{-3} + 3,1 + 0,2 + \\ &+ 0,2 + 1,726 \cdot 10^{-2} = 3,524 \text{ мг-экв/дм}^3. \end{aligned}$$

Ошибка электронейтральности равна:

$$\begin{aligned} \Delta_{\text{кон}} &= \left| \frac{\sum Kt - \sum An}{\sum Kt + \sum An} \right| \cdot 100 \% = \left| \frac{3,531 - 3,524}{3,531 + 3,524} \right| \cdot 100 \% = \left| \frac{0,007}{7,055} \right| \cdot 100 \% = \\ &= 0,099 \% < 1. \end{aligned}$$

Следовательно, расчёт конечного раствора произведён правильно.

### 13. Ионная сила конечного раствора.

Полный расчёт для конечного раствора (известково-коагулированный раствор):

$$\mu_{\text{кон}} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n C_i \cdot z_i^2.$$

$$\begin{aligned} \mu_{\text{кон}} &= \frac{1}{2} (C_{\text{Ca}^{2+}} \cdot 2^2 + C_{\text{H}^+} \cdot 1^2 + C_{\text{Mg}^{2+}} \cdot 2^2 + C_{\text{Na}^+} \cdot 1^2 + C_{\text{HCO}_3^-} \cdot 1^2 + \\ &+ C_{\text{CO}_3^{2-}} \cdot 2^2 + C_{\text{Cl}^-} \cdot 1^2 + C_{\text{SO}_4^{2-}} \cdot 2^2 + C_{\text{OH}^-} \cdot 1^2) = \frac{1}{2} (1,346 \cdot 10^{-3} \cdot 4 + \\ &+ 6,312 \cdot 10^{-11} \cdot 1 + 2,70 \cdot 10^{-4} \cdot 4 + 0,3 \cdot 10^{-3} \cdot 1 + 6,243 \cdot 10^{-6} \cdot 1 + 8,628 \cdot 10^{-6} \cdot 4 + \\ &+ 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1 + 1,55 \cdot 10^{-3} \cdot 4 + 0,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1) = 6,702 \cdot 10^{-3} \text{ моль/дм}^3. \end{aligned}$$

14. Рассчитаем коэффициент активности и делаем повторный расчёт для конечного раствора.

$$\lg f = \frac{-0,5 \cdot z^2 \cdot \sqrt{\mu}}{1 + \sqrt{\mu}};$$

для одновалентных ионов:

$$\lg f_1 = \frac{-0,5 \cdot 1^2 \cdot \sqrt{6,702 \cdot 10^{-3}}}{1 + \sqrt{6,702 \cdot 10^{-3}}} = -0,0359, \quad f_1 = 10^{-0,0359} = 0,921;$$

для двухвалентных ионов:

$$\lg f_2 = \frac{-0,5 \cdot 2^2 \cdot \sqrt{6,702 \cdot 10^{-3}}}{1 + \sqrt{6,702 \cdot 10^{-3}}} = -0,145, \quad f_2 = 10^{-0,145} = 0,717;$$

для трёхвалентных ионов:

$$\lg f_3 = \frac{-0,5 \cdot 3^2 \cdot \sqrt{6,702 \cdot 10^{-3}}}{1 + \sqrt{6,702 \cdot 10^{-3}}} = -0,324, \quad f_3 = 10^{-0,324} = 0,474.$$

15. Концентрацию  $\text{OH}^-$ , протона  $\text{H}^+$  и pH обрабатываемой воды:

$$a_{\text{OH}^-} = f_1 \cdot C_{\text{OH}^-} = 0,921 \cdot 0,2 = 0,1842 \text{ мг-экв/дм}^3 = 1,82 \cdot 10^{-4} \text{ моль/дм}^3,$$

$$a_{\text{H}^+} = \frac{I_w}{a_{\text{OH}^-}} = \frac{10^{-14}}{1,82 \cdot 10^{-4}} = 5,429 \cdot 10^{-11} \text{ моль/дм}^3 = 5,429 \cdot 10^{-8} \text{ мг-экв/дм}^3.$$

$$\text{pH} = -\lg a_{\text{H}^+} = \lg(5,429 \cdot 10^{-11}) = 10,265;$$

$$C_{\text{H}^+} = \frac{a_{\text{H}^+}}{f_1} = \frac{5,429 \cdot 10^{-11}}{0,921} = 5,895 \cdot 10^{-11} \text{ моль/дм}^3 = 5,895 \cdot 10^{-8} \text{ мг-экв/дм}^3.$$

16. Концентрация растворённых ионов железа в обрабатываемой воде:

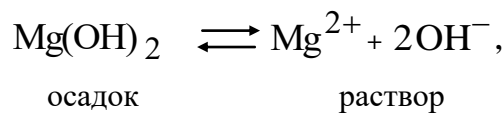
$$a_{\text{Fe}^{3+}} = \frac{\text{ПР}_{\text{Fe}(\text{OH})_3}}{a_{\text{OH}^-}^3} = \frac{3,8 \cdot 10^{-38}}{(1,842 \cdot 10^{-4})^3} = 6,080 \cdot 10^{-27} \text{ моль/дм}^3 =$$

$$= 1,82 \cdot 10^{-25} \text{ мг-экв/дм}^3.$$

$$C_{\text{Fe}^{3+}} = \frac{a_{\text{Fe}^{3+}}}{f_3} = \frac{6,080 \cdot 10^{-27}}{0,474} = 1,283 \cdot 10^{-26} \text{ моль/дм}^3 =$$

$$= 3,848 \cdot 10^{-23} \text{ мг-экв/дм}^3.$$

17. В результате известкования катиона  $\text{Mg}^{2+}$  образуется осадок  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ , который выпадает на дно осветлителя в виде шлама:



$$a_{\text{Mg}^{2+}} = \frac{\text{ПР}_{\text{Mg}(\text{OH})_2}}{a_{\text{OH}^-}^2} = \frac{5,5 \cdot 10^{-12}}{(1,842 \cdot 10^{-4})^2} = 1,621 \cdot 10^{-4} \text{ моль/дм}^3,$$

$$C_{\text{Mg}^{2+}}^{\text{кон}} = \frac{a_{\text{Mg}^{2+}}}{f_2} = \frac{1,621 \cdot 10^{-4}}{0,717} = 2,261 \cdot 10^{-4} \text{ моль/дм}^3 = 0,452 \text{ мг-экв/дм}^3,$$

$$C_{\text{Mg}^{2+}}^{\text{кон}} = \min(C_{\text{Mg}^{2+}}^{\text{исх}}; C_{\text{Mg}^{2+}}^{\text{кон}}) = \min(0,691 \cdot 10^{-3} \text{ моль/дм}^3;$$

$$0,2261 \cdot 10^{-3} \text{ моль/дм}^3) = 0,2261 \cdot 10^{-3} \text{ моль/дм}^3,$$

$$\Delta C_{\text{Mg}^{2+}}^{\text{кон}} = C_{\text{Mg}^{2+}}^{\text{исх}} - C_{\text{Mg}^{2+}}^{\text{кон}} = 0,691 \cdot 10^{-3} - 0,2261 \cdot 10^{-3} =$$

$$= 0,465 \cdot 10^{-3} \text{ моль/дм}^3.$$

18. Концентрацию  $C_{\text{HCO}_3^-}^{\text{кон}}$  раствора:

$$C_{\text{CO}_3^{2-}} = \frac{K_{\text{H}_2\text{CO}_3}^{\text{II}} \cdot C_{\text{HCO}_3^-}}{C_{\text{H}^+} \cdot f_2} = \frac{5,61 \cdot 10^{-11} \cdot C_{\text{HCO}_3^-}}{5,895 \cdot 10^{-11} \cdot 0,717} = 1,327 \cdot C_{\text{HCO}_3^-} \text{ моль/дм}^3.$$

Пусть концентрация  $C_{\text{HCO}_3^-} = x$  моль/дм<sup>3</sup> = 1000· $x$  мг-экв/дм<sup>3</sup>:

$$a_{\text{Ca}^{2+}} = \frac{\text{ПР}_{\text{CaCO}_3}}{a_{\text{CO}_3^{2-}}} = \frac{\text{ПР}_{\text{CaCO}_3}}{C_{\text{CO}_3^{2-}} \cdot f_2} = \frac{4,8 \cdot 10^{-9}}{1,327 \cdot x \cdot 0,717} = \frac{5,045 \cdot 10^{-9}}{x} \text{ моль / дм}^3$$

$$C_{\text{Ca}^{2+}} = \frac{a_{\text{Ca}^{2+}}}{f_2} = \frac{5,045 \cdot 10^{-9}}{x \cdot 0,717} = \frac{7,036 \cdot 10^{-9}}{x} \text{ моль/дм}^3 =$$

$$= \frac{1,407 \cdot 10^{-5}}{x} \text{ мг-экв/дм}^3.$$

По аналогии  $C_{\text{HCO}_3^-}^{\text{КОН}}$  рассчитывается из уравнения электронейтральности:

$$\sum Kt^{\text{КОН}} = \sum An^{\text{КОН}}.$$

$$C_{\text{H}^+}^{\text{КОН}} + C_{\text{Ca}^{2+}}^{\text{КОН}} + C_{\text{Mg}^{2+}}^{\text{КОН}} + C_{\text{Na}^+}^{\text{КОН}} = C_{\text{HCO}_3^-}^{\text{КОН}} + C_{\text{SO}_4^{2-}}^{\text{КОН}} + C_{\text{Cl}^-}^{\text{КОН}} + C_{\text{CO}_3^{2-}}^{\text{КОН}} + C_{\text{OH}^-}^{\text{КОН}}.$$

Концентрация катионов, мг-экв/дм <sup>3</sup>	Концентрация анионов, мг-экв/дм <sup>3</sup>
$C_{\text{Ca}^{2+}}^{\text{КОН}} = \frac{1,407 \cdot 10^{-5}}{x}$	$C_{\text{SO}_4^{2-}}^{\text{КОН}} = 3,1$
$C_{\text{Mg}^{2+}}^{\text{КОН}} = 0,452$	$C_{\text{OH}^-}^{\text{КОН}} = 0,2$
$C_{\text{H}^+}^{\text{КОН}} = 5,895 \cdot 10^{-8}$	$C_{\text{Cl}^-}^{\text{КОН}} = 0,2$
$C_{\text{Na}^+}^{\text{КОН}} = 0,3$	$C_{\text{HCO}_3^-}^{\text{КОН}} = 1000 \cdot x$
—	$C_{\text{CO}_3^{2-}}^{\text{КОН}} = 1,327 \cdot 2000 \cdot x$

$$\frac{1,407 \cdot 10^{-5}}{x} + 0,452 + 5,895 \cdot 10^{-8} + 0,3 = 3,1 + 0,2 + 0,2 + 1000 \cdot x +$$

$$+ 1,327 \cdot 2000 \cdot x + 0,2.$$



$$3654 \cdot x^2 + 2,748 - 1,407 \cdot 10^{-5} = 0.$$

$$D = 7,551 + 0,206 = 7,757 > 0.$$

$$x = C_{\text{HCO}_3^-}^{\text{кон}} = \frac{-2,748 + 2,785}{7308} = 5,063 \cdot 10^{-6} \text{ моль/дм}^3,$$

$$C_{\text{HCO}_3^-}^{\text{кон}} = 5,063 \cdot 10^{-6} \text{ моль/дм}^3 = 5,063 \cdot 10^{-3} \text{ мг-экв/дм}^3,$$

$$C_{\text{CO}_3^{2-}} = 1,327 \cdot 5,063 \cdot 10^{-6} = 6,718 \cdot 10^{-6} \text{ моль/дм}^3 = 1,344 \cdot 10^{-2} \text{ мг-экв/дм}^3,$$

$$C_{\text{Ca}^{2+}}^{\text{кон}} = \frac{1,407 \cdot 10^{-5}}{5,063 \cdot 10^{-6}} = 2,779 \text{ мг-экв/дм}^3 = 1,389 \cdot 10^{-3} \text{ моль/дм}^3.$$

19. Правильность нахождения концентрации проверяется по уравнению электронейтральности:

$$\begin{aligned} \Sigma Kt &= C_{\text{H}^+}^{\text{кон}} + C_{\text{Ca}^{2+}}^{\text{кон}} + C_{\text{Mg}^{2+}}^{\text{кон}} + C_{\text{Na}^+}^{\text{кон}} = 5,96 \cdot 10^{-8} + 2,779 + 0,452 + 0,3 = \\ &= 3,531 \text{ мг-экв/дм}^3, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Sigma An &= C_{\text{HCO}_3^-}^{\text{кон}} + C_{\text{SO}_4^{2-}}^{\text{кон}} + C_{\text{Cl}^-}^{\text{кон}} + C_{\text{CO}_3^{2-}}^{\text{кон}} + C_{\text{OH}^-}^{\text{кон}} = 5,063 \cdot 10^{-3} + 3,1 + 0,2 + \\ &+ 1,344 \cdot 10^{-2} = 3,519 \text{ мг-экв/дм}^3, \end{aligned}$$

$$\Delta = \left| \frac{\Sigma Kt - \Sigma An}{\Sigma Kt + \Sigma An} \right| \cdot 100 \% = \left| \frac{3,531 - 3,519}{3,531 + 3,519} \right| \cdot 100 \% = 0,17 \% < 1.$$

Следовательно, расчёт конечного раствора произведён правильно.

20. Показатели качества воды после предочистки.

Химический состав воды и изменение состава воды после предочистки указаны в табл. 3.

Таблица 3

## Показатели качества воды и их изменение после предочистки

Химический состав	Содержание			Процентное содержание, %
	мг/дм <sup>3</sup>	мг-экв/дм <sup>3</sup>	моль/дм <sup>3</sup>	
Ca <sup>2+</sup>	55,67	2,779	$1,389 \cdot 10^{-3}$	45,4
Mg <sup>2+</sup>	5,49	0,452	$0,226 \cdot 10^{-3}$	67,3
Na <sup>+</sup>	6,9	0,3	$0,3 \cdot 10^{-6}$	–
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0,309	$5,063 \cdot 10^{-3}$	$5,063 \cdot 10^{-3}$	99,9
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	148,8	3,1	$1,55 \cdot 10^{-3}$	–31,9
Cl <sup>-</sup>	7,1	0,2	$0,2 \cdot 10^{-3}$	–
SiO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	6,12	–	–	40
Окисляемость, кг O <sub>2</sub> /дм <sup>3</sup>	5,95	–	–	30
Солесодержание	224,889	–	–	50

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Громогласов, А. А. Водоподготовка: Процессы и аппараты: учеб. пособие для вузов / А.А. Громогласов, А.С. Копылов, А.П. Пильщиков; под общ. ред. О.И. Мартыновой. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 272 с.
2. Кострикин, Ю. М. Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления: справочник / Ю.М. Кострикин, Н.А. Мещерский, О.В. Коровина. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 254 с.
3. Вихрев, В. Ф. Водоподготовка: учебник для вузов / В.Ф. Вихрев, М.С. Шкроб; под ред. М.С. Шкроб. – Изд. 2-е перераб. и доп. – М.: Энергегия, – 1973. 416с.
4. Методические указания по предотвращению образования минеральных и органических отложений в конденсаторах турбин и их очистке: РД 34.22.501-87: утв. Главным научно-техническим управлением энергетики и электрификации 28.12.87: введ. в действие с 01.01.1988. – М.: СПО Союзтехэнерго, 1988.
5. Белоконова, А. Ф. Водно-химические режимы тепловых электростанций: научное издание / А.Ф. Белоконова. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 248 с.
6. Бадалов, Б. Ш. Повторное использование стоков химобессоливающих установок при подготовке подпиточной воды теплосети / Б.Ш. Бадалов. – Баку: Елм, 2009. –148 с.
7. Соколов, Э. Я. Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов / Э.Я. Соколов. – 6-е изд., перераб. – М.: МЭИ, 1999. – 472 с.
8. Стерман, Л. С. Химические и термические методы обработки воды на ТЭС: учеб. пособие для вузов / Л.С. Стерман, В.Н. Покровский. – М.: Энергия, 1981. – 232 с.
9. Белан, Ф.И. Водоподготовка (расчеты, примеры, задачи) / Ф.И. Белан. – М.: Энергия, 1980. – 256 с.
10. Предварительная очистка воды в схемах водоподготовки: учеб. пособие по дисциплинам «Водоподготовка», «Химико-технологические процессы, аппараты и режимы», по направлению «Теплоэнергетика» / А. В. Богловский, А. С. Копылов, В. Ф. Очков, и др. – М. : МЭИ, 2002. – 79 с.
11. Гребенок, В. Д. Обессоливание воды ионитами / В.Д. Гребенок, А.А. Мазо. – М.: Химия, 1980. – 256 с.
12. Лившиц, О. В. Справочник по водоподготовке / О.В. Лившиц. – 2-е издание. – М.: Энергия, 1976. – 238 с.
13. Лапотышкина, Н. П. Водоподготовка и водно-химический режим тепловых сетей / Н.П. Лапотышкина, Р.П. Сазонов. – М.: Энергоиздат, 1982. – 200 с.

14. Нормы качества подпиточной и сетевой воды тепловых сетей. НР-34-70-051-83. – М.: СПО Соютехэнерго, 1984.

15. Копылов, А. С. Водоподготовка в энергетике: учеб. пособие / А.С. Копылов, В. М. Лавыгин, В.Ф. Очков. – М.: МЭИ, 2003. – 309 с.

16. Кулешов, В. Н. Химический анализ в теплоэнергетике / В.Н. Кулешов, Ю.А. Морыганова, В.Л. Меньшикова и др. – М.: МЭИ, 2004 – 128 с.

17. Применение антинакипинов и ингибиторов коррозии в системах теплоснабжения и оборотного охлаждения. Информация ВТИ // Промышленная энергетика. – 2006. – № 6.

18. Федосеев, Б. С. Обобщение опыта применения фосфорорганических антинакипинов и ингибиторов коррозии / Б.С. Федосеев, Ю.В. Балабан-Ирменин, А.М. Рубашов // Энергетик. – 2006. – № 3.

19. Резник, Я. О. О «Нехимических» методах обработки воды // Энергосбережение и водоподготовка, 2006. – № 5(43). – С. 13–15.

20. Николаева, Л. А. Водно-химические режимы теплоэнергетических объектов: учеб. пособие / Л.А. Николаева, М.Н. Котляр. – Казань: КГЭУ, 2011. – 167 с.

21. Цуканова, Т. В. Использование комплексных соединений при подготовке добавочной воды для оптимизации водно-химического режима водогрейных котлов и систем теплоснабжения: диссертация кандидата технических наук: 05.14.14: защищена 19.12.2007 / Татьяна Вячеславовна Цуканова. – М., 2007. – 127 с.

22. Гирфанов, А. А. Подготовка подпиточной воды для теплосети методом микрофльтрации на Казанской ТЭЦ-2 [Электронный ресурс]: Режим доступа: [rosteplo.ru/Tech\\_stat/stat\\_shablon.php?id=3024](http://rosteplo.ru/Tech_stat/stat_shablon.php?id=3024). Дата обращения 1.11.2017.

23. Гужулев, Э. П. Водоподготовка и водно-химические режимы в теплоэнергетике: учеб. пособие / Э.П. Гужулев, В.В. Шалай, В.И. Гриценко, М.А. Таран. – Омск: ОмГТУ, 2005. – 384 с.

24. Особенности применения антинакипинов в системах теплоснабжения / Ю.В. Балабан-Ирменин, П.С. Суслов, ОАО Всероссийский теплотехнический институт (ВТИ) // Новости теплоснабжения. – 2011. – № 12. – С.42–44.

25. Сенатов, С. Современные органические фосфонаты – современный выбор водоподготовки тепловых сетей, возможность увеличения отпуска тепловой энергии / С. Сенатов // Теплоэнергетика. – № 3(50), август. – 2014. – С. 28–31.

26. Чаусов, Ф. Ф. Применение ингибиторов солеотложений и коррозии в системах отопления / Ф.Ф. Чаусов // Сантехника отопление кондиционирование. – 2003. – № 9. –С. 12–15.

27. Користев, Д. П. Водный режим и обработка радиоактивных вод АЭС: учеб. пособие для техникумов / Д.П. Користев. – М: Энергоатомиздат, 1983 – 240 с.

28. Мартынова, О. И. Водно-химические режимы АЭС, системы их поддержания и контроля / О.И. Мартынова, А.С. Копылов. – М: Энергоатомиздат, 1983 – 98 с.

29. Плютинский, В. И. Автоматическое управление и защита тепло-энергетических установок АЭС / В.Н. Плютинский, В.И. Погорелов. – М.: Энергоатомиздат, 1983.

30. Нормы технологического проектирования тепловых электрических станций / ВНТП 81. – М., 1981.

31. Водоподготовка: Справочник; под ред. д.т.н., действительного члена Академии промышленной экологии С.Е. Беликова. М.: Аква-Терм, 2007. – 240 с.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение</b> .....	3
<b>Глава 1. Примеси природных вод. Показатели качества воды</b> .....	6
1.1. Типичная схема обращения воды в циклах ТЭС .....	6
1.2. Классификация примесей природных вод .....	9
Физико-химические и технологические показатели качества	
1.3. воды .....	10
<b>Глава 2. Водно-химические режимы оборудования ТЭОУ</b> .....	23
Водно-химический режим подогревателей низкого и высокого	
2.1. давления .....	23
2.2. Водно-химический режим турбины .....	23
2.3. Водно-химический режим конденсаторов турбин .....	23
2.4. Водно-химический режим тепловых сетей .....	24
2.4.1. Водоподготовка подпиточной воды для систем теплоснабжения..	24
2.4.2. Водно-химический режим тепловых сетей .....	31
2.4.3. Механизм действия ингибиторов .....	35
2.5. Водно-химический режим барабанных котлов .....	36
2.5.1. Характеристика водно-химических режимов барабанных котлов..	36
2.5.2. Методы повышения чистоты пара .....	40
2.5.3. Коррекционные режимы котловой воды .....	43
2.5.3.1. Фосфатирование котловой воды .....	43
2.5.3.2. Комплексонная обработка питательной воды .....	47
2.5.3.3. Гидразинно-аммиачный водно-химический режим .....	52
2.5.3.4. Гидразинный водно-химический режим .....	55
2.5.3.5. Водно-химические режимы прямоточных котлов .....	58
2.5.3.6. Комплексонный водно-химический режим .....	61
2.5.3.7. Окислительный водно-химический режим .....	62
<b>Глава 3. Водно-химические режимы АЭС</b> .....	68
Водно-химический режим первого контура АЭС с реактором	
3.1. ВВЭР .....	68
Водно-химический режим второго контура АЭС с реактором	
3.2. ВВЭР .....	71
3.3. Водно-химический режим одноконтурных АЭС .....	74
3.4. Водно-химический режим АЭС с реакторами на быстрых	
нейтронах .....	76

<b>Глава 4. Водоподготовительная установка</b> .....	81
4.1. Выбор схемы ВПУ .....	81
4.2. Расчет производительности ВПУ .....	85
4.3. Компоновка помещений ВПУ .....	86
<b>Глава 5. Процессы предварительной очистки воды на водоподготовительных установках</b> .....	90
5.1. Физико-химические основы коагуляции .....	90
5.2. Физико-химические основы известкования .....	95
5.3. Аппараты и схемы предварительной очистки воды .....	97
5.4. Осветлительные фильтры .....	101
5.5. Конструкция осветлителей .....	105
5.6. Современные осветлители .....	109
5.7. Расчет и проектирование осветлителей .....	111
5.8. Наладка и эксплуатация установок предварительной очистки воды .....	113
5.9. Схемы реагентного хозяйства .....	115
<b>Глава 6. Ионитное химическое обессоливание</b> .....	118
6.1 Иониты. Свойства и характеристики .....	118
6.1.1. Гранулометрический состав ионитов .....	120
6.1.2. Насыпная масса и насыпной объем .....	122
6.1.3. Механическая прочность .....	122
6.1.4. Осмотическая прочность .....	123
6.1.5. Химическая стойкость .....	123
6.1.6. Термическая стойкость .....	123
6.1.7. Ионообменные свойства .....	125
6.1.8. Селективность .....	126
6.1.9. Плотность .....	128
6.2. Схемы ионитного химического обессоливания .....	128
6.3. Аппараты ионитного химического обессоливания .....	131
6.4. Типы регенерации ионитных фильтров .....	132
6.5. Технология противоточного натрий-катионирования в промышленной котельной .....	136
6.6. Фильтры смешанного действия с внутренней регенерацией. Устройство и назначение .....	140
6.7. Фильтры смешанного действия с наружной регенерацией. Устройство и назначение .....	144
6.7.1. Регенерация фильтра смешанного действия с наружной регенерацией .....	147
6.8. Сравнительная характеристика ФСДВР и ФСДНР .....	149
6.9. Наладка и эксплуатация установок ионитной очистки воды	150

6.10.	Реагентное хозяйство ионитных установок .....	155
6.11.	Иониты .....	156
6.11.1.	Промышленные катиониты .....	156
6.11.2.	Промышленные аниониты .....	159
<b>Заключение</b> .....		162
<b>Приложение</b> .....		163
<b>Библиографический список</b> .....		179

---

*Учебное издание*

**Котляр Мирослава Николаевна,  
Николаева Лариса Андреевна**

**ВОДОПОДГОТОВКА И ВОДНО-ХИМИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ  
НА ТЕПЛОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ОБЪЕКТАХ**

*Учебное пособие*

Кафедра технологии воды и топлива КГЭУ

Редактор *Е.С. Дремичева*  
Компьютерная верстка *Т.И. Лунченкова*

Подписано в печать 11.07.2019.  
Формат 60 × 84/16. Гарнитура «Times». Вид печати РОМ. Бумага ВХИ.  
Усл. печ. л. 10,70. Уч.-изд. л. 7,68. Заказ № 252/эл