

## **Раздел 6. ВОДНЫЙ РЕЖИМ И КАЧЕСТВО ПАРА КОТЛОВ. ЗАГРЯЗНЕНИЕ И ОЧИСТКА НАРУЖНЫХ И ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НАГРЕВА (4 часа) Разделы РПД 6.1 и 6.2**

Надежная и экономичная работа котла и паровой турбины возможна при обеспечении отсутствия внутренних отложений на поверхностях нагрева, снижении до возможного минимума коррозии конструкционных материалов и получении в котле пара высокой чистоты. Эти задачи решаются организацией рационального водного режима, включающего в себя надлежащую обработку питательной воды в сочетании с определенными конструктивными мероприятиями и соответствующую очистку питательной и добавочной воды от имеющихся в них газообразных и твердых примесей. Последние могут находиться как в растворенном, так и взвешенном состоянии.

### **6.1. Образование накипи**

Вместе с питательной водой в котлы поступают различные минеральные примеси, в том числе соединения кальция и магния, оксиды железа, алюминия, меди и пр. Все примеси, находящиеся в воде, делятся на трудно- и легкорастворимые. К числу труднорастворимых примесей относятся соли и гидроксиды Ca и Mg, а также оксиды конструкционных материалов. В питательной воде и с учетом ее состава в котловой воде могут присутствовать катионы  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и анионы  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{SiO}_2^{2-}$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  и т. п.

Основные накипеобразователи имеют отрицательный температурный коэффициент растворимости (т. е. при повышении температуры их растворимость уменьшается), и при высоких температурах их растворимость на пять порядков меньше растворимости легкорастворимых веществ.

Температурные коэффициенты растворимости легкорастворимых соединений ( $\text{NaOH}$ ,  $\text{Na}_3\text{PO}_4$ ,  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) при температурах воды более 200 °С отрицательны, а при нормальных условиях работы котла их концентрация во много раз ниже допустимой концентрации в котловой воде.

Накапливаясь в котле по мере испарения воды, эти примеси после наступления состояния насыщения начинают из нее выпадать. Прежде всего

состояние насыщения наступает для солей жидкости  $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$ ,  $\text{CaCO}_2$ ,  $\text{MgCO}_2$  и др., и они начинают выпадать из воды в виде кристаллов. Центрами кристаллизации служат шероховатости на поверхностях нагрева, а также взвешенные и коллоидные частицы, находящиеся в воде котла. Вещества, кристаллизующиеся на поверхности нагрева, образуют плотные и прочные отложения — накипь. Вещества, кристаллизующиеся в объеме воды, образуют взвешенные в ней частицы - шлам. Образование накипи на поверхностях нагрева объясняется процессами взаимодействия между противоположно заряженными частицами накипеобразователей и металлической стенкой. Выделение твердой фазы на поверхности может происходить также в процессе парообразования, до того как будет достигнуто состояние перенасыщения накипеобразователей в объеме воды вследствие выпаривания водяной оболочки пузырьков пара, образующихся на поверхности нагрева. Образовавшаяся первичная накипь является основой для отложения вторичных видов накипи - прикипевшего шлама, отложений продуктов коррозии металла.

Наиболее распространены [1] кальциевая и магниевая первичная накипи, в составе которых преобладают  $\text{CaSO}_4$ ,  $\text{CaSiO}_3$ ,  $5\text{CaO}$ ,  $5\text{SiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CaCO}_2$ ,  $\text{Mg}(\text{OH})_2$ . Накипь, как правило, имеет низкую теплопроводность, составляющую 0,1-0,2 Вт/(м·К). Поэтому даже малый слой накипи приводит к резкому ухудшению условий охлаждения металла поверхностей нагрева и вследствие этого к повышению его температуры. При этом у поверхностей нагрева, расположенных в области высоких температур (экраны, фестоны, первые ряды труб конвективного пучка), температура металла может превысить предельную по условиям прочности, после чего начинается образование [отдулин](#) с утонением стенки трубы (рисунок 1). Затем проявляется свищ — отверстие вдоль образующей трубы, через который с большой скоростью вытекает струя воды, и котел приходится останавливать (рисунок 2).

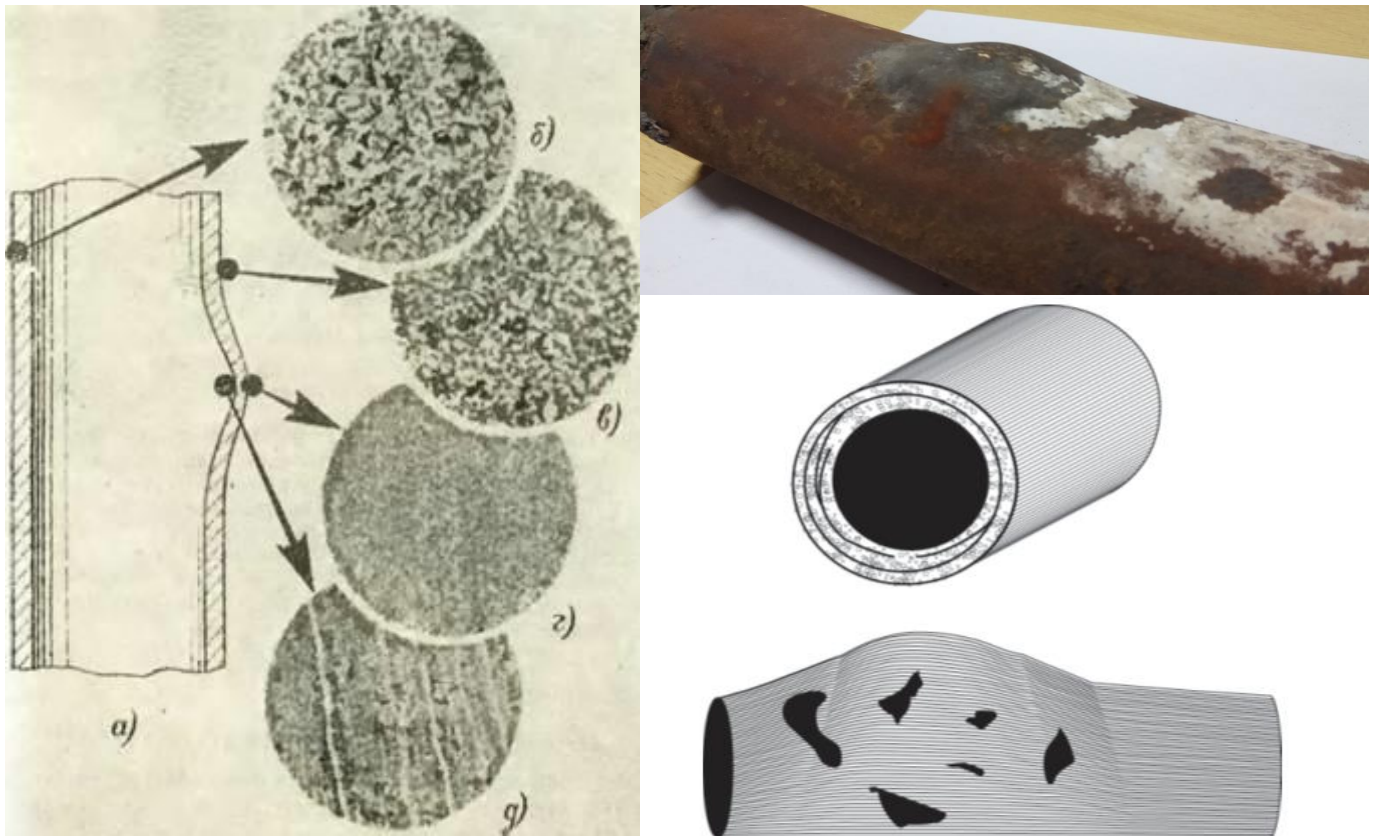


Рисунок 1. Изменение структуры стали марки 20 в зоне отдушины на экранной трубе диаметром 60x5 мм, работавшей при давлении 110 атм. а) - схема деформированного участка трубы; б) - исходная структура металла; в) - структура на границе отдушины; г) и д) - структура наружной и внутренней поверхностей металла в наиболее утоненной части отдушины (увеличено в 75 раз).



Рисунок 2. Свищ в трубе

Накипь недопустима и в поверхностях нагрева, расположенных в зоне более низких температур, так как приводит к снижению КПД котла в результате уменьшения коэффициента теплопередачи и связанного с этим повышения температуры уходящих газов.

В отличие от соединений Ca и Mg, образующих накипь, силикат магния  $MgSiO_3$  и некоторые другие его соединения в барабанных котлах образуют шлам.

Концентрация солей натрия в воде испарительной поверхности нагрева всегда ниже их предела насыщения. Однако и эти соли могут отложиться на поверхностях нагрева в тех случаях, когда капли воды, находящиеся в паре и попадающие на поверхность нагрева, испаряются полностью, что имеет место в

прямоточных котлах.

Соединения железа, алюминия и меди, находящиеся в воде в виде растворенных коллоидных и ультратонких взвесей, также могут откладываться на поверхности нагрева и входить в состав накипи. Попадая в турбину, они образуют плотные отложения. Железо и алюмосиликатные частицы накипи образуются при попадании частиц взвеси этих соединений на поверхности нагрева с относительно высокой температурой, где, вступая в реакцию с другими веществами, они образуют сложные нерастворимые в воде соединения. Накипи из оксидов железа и меди образуются в зонах высоких местных тепловых нагрузок поверхностей нагрева  $q > 150 \text{ кВт/м}^2$ , чаще всего в трубах экранов.

В котлах высокого давления вредное влияние на надежность его работы и на качество пара оказывает содержание в воде соединений кремниевой кислоты  $\text{H}_2\text{SiO}_3$ , вынос которых паром пропорционален содержанию  $\text{SiO}_3$  в воде. При давлении в котле больше 7 МПа кремниевая кислота приобретает способность растворяться в паре, причем с повышением давления эта способность резко возрастает. Поступая вместе с паром в пароперегреватель,  $\text{H}_2\text{SiO}_3$  разлагается с выделением  $\text{H}_2\text{O}$ . В результате в паре появляется  $\text{SiO}_2$ . Попадая в турбину вместе с паром,  $\text{SiO}_2$  образует на ее лопатках нерастворимые соединения, которые приводят к ухудшению экономичности и надежности работы турбины и необходимости ее останова для удаления отложений. Влияет на работу поверхностей нагрева содержание в питательной воде минеральных масел и тяжелых нефтепродуктов, которые могут поступать вместе с конденсатом от производственных потребителей. Отложение малотеплопроводной пленки масла или нефтепродуктов ухудшает условия охлаждения поверхностей нагрева и оказывает такое же влияние, как и накипь.

На режим работы котла вредное влияние оказывает также повышенная щелочность воды; увеличенная щелочность может привести к вспениванию воды в барабане и в предельном случае — к заполнению вспененной водой всего парового объема барабана. Вспениванию воды способствует содержание в ней органических соединений и аммиака. В этих условиях сепарационные устройства

не обеспечивают отделения капель воды от пара, и вода из барабана, содержащая различные примеси, может поступать в пароперегреватель и затем в турбину, создавая опасность их загрязнения и нарушения нормальных условий работы. Повышенная щелочность может явиться причиной появления щелочной коррозии металла, а также возникновения трещин в местах вальцовки труб в коллекторы и барабан.

Растворенные в питательной воде агрессивные газы  $O_2$  и  $CO_2$  вызывают различные формы коррозии металла элементов водопарового тракта, вследствие чего уменьшается их механическая прочность. Пониженная щелочность воды ускоряет коррозию и поэтому должна поддерживаться в питательной воде на определенном уровне. В котлах низкого давления требуемое значение рН поддерживается вводом в питательную воду соды, а в барабанных котлах высокого давления - фосфатов или аммиака.

В связи с указанными вредными влияниями на работу котла различных примесей в воде их предельно допустимое содержание в питательной воде нормируется.

## 6.2. Показатели качества питательной воды

Показателями качества питательной воды барабанных котлов соответственно при давлениях  $P_6$  (МПа) до 4; 4-10 и более 10 являются:

**солесодержание** - суммарная концентрация в воде катионов и анионов, определяемая по общему ионному составу, мг/кг;

**общая жесткость** воды - общая суммарная концентрация ионов кальция и магния –  $J_0 = J_{Ca} + J_{Mg}$  (5; 3 и 1), мкг-экв/кг;

**щелочность** воды общая  $Щ_0$  - сумма эквивалентных концентраций в растворе анионов слабых кислот и ионов гидроксила (кроме ионов водорода), мг-экв/кг;

**кремнесодержание** - общая концентрация в воде кремнесодержащих соединений, выраженная в пересчете на  $SiO_2$  (-; 80 и 40), мкг/кг;

**содержание соединений железа** (200; 100 и 30) и меди (20; 20 и 5), мкг/кг;

показатель **концентрации водородных ионов** ( $pH = 9,1 \pm 0,1$ ) характеризующий реакцию воды (кислая, щелочная, нейтральная);

**содержание растворенных газов** в воде -  $O_2$  (20; 20 и 10);  $CO_2$ , мкг/кг.

На основе теплехимических испытаний котлов и длительного опыта их эксплуатации установлены нормы качества питательной воды котлов [2].

В нормах для котлов с естественной циркуляцией указано допустимое содержание различных примесей в воде в зависимости от давления. Например, при давлении меньше 4 МПа общая жесткость воды должна быть меньше 5 мкг-экв/кг, а кислорода меньше 20 мкг/кг. Содержание кремниевой кислоты не нормируется. При давлении 10 МПа общая жесткость воды менее 3 мкг/кг, кислорода менее 20 мкг/кг и кремниевой кислоты менее 80 мкг/кг. Качество питательной воды для прямоточных котлов должно удовлетворять более жестким требованиям. Например, общая жесткость менее 0,2-0,3 мкг-экв/кг, содержание кремниевой кислоты менее 30 мкг/кг; жестко ограничивается содержание кислорода в питательной воде прямоточных котлов, соединений натрия, железа, меди и т. п.

### **6.3. Системы подготовки питательной воды**

Современные энергетические котлы работают на смеси конденсата вырабатываемого ими пара и химически очищенной воды или дистиллята, восполняющей потери рабочего тела. На конденсационных районных электростанциях потери конденсата пара составляют 0,5-1 %. На промышленных ТЭЦ потери конденсата составляют 20-40, а в производственных котельных установках могут достигать 70 % и более. Восполнение потерь конденсата в установках с котлами низкого, среднего и высокого давления обычно производится химически очищенной природной водой. Добавка к конденсату дистиллята применяется для питания прямоточных котлов с высокими и сверхвысокими параметрами пара. Основные способы приготовления добавочной воды и обработки конденсата, используемого для питания энергетических котлов, указаны в [3-11], а для паровых котлов низких давлений и водогрейных котлов в - [12-14].

В схемах питания котлов ТЭЦ, имеющих турбины с регулируемым отбором пара на производство и нерегулируемыми отборами для регенеративного

подогрева питательной воды, добавочная вода, возмещающая потери конденсата после химической очистки, поступает в деаэрактор, в который подается также конденсат от турбины, от производственных потребителей (после его очистки) и от регенеративных подогревателей. После удаления в деаэраторе растворенных в питательной воде газов  $O_2$  и  $CO_2$  вода подается питательными насосами через регенеративные подогреватели высокого давления в котел.

Для котлов при давлении менее 10 МПа применяются упрощенные методы очистки добавочной воды. Для котлов высокого давления восполнение потерь пара и конденсата производится обессоленной водой, приготовляемой методом химического обессоливания исходной маломинерализованной воды с применением ионитов в Н-ОН формах, с учетом требований защиты окружающей среды. Для очистки высокоминерализованной воды применяются испарительные установки. Питательная вода испарителей должна по качеству соответствовать питательной воде котлов при давлении 4 МПа.

Существуют следующие основные схемы обработки добавочной воды и области их применения: Na-катионирование – на ТЭЦ и промышленных котельных с барабанными котлами низкого давления и для подготовки воды в теплосетях; Н-Na-катионирование, ионирование – то же для котлов средних давлений; химическое ступенчатое обессоливание и испарительные установки – для котлов ВД, СВД и СВК.

Удаление газов, растворенных в воде, -  $O_2$ ,  $CO_2$  осуществляют термической деаэрацией воды [15]. Применяются атмосферные деаэраторы на давление 0,12 МПа [16], деаэраторы повышенного давления - 0,4 МПа и вакуумные деаэраторы [17]. Химическое обескислороживание используется для полного связывания кислорода с применением восстановителей (гидразина) по формуле  $N_2H_4 + O_2 \rightarrow N_2 + H_2O$ .

Для водогрейных котлов и паровых котлов низких давлений могут использоваться безреагентные методы обработки воды [18]. Авторами данного учебного пособия исследовалась [19] возможность подготовки сетевой и питательной воды с помощью магнитной, акустической, электроимпульсной и

электрохимической активации.

#### **6.4. Водный режим и продувка котлов**

В барабанных котлах с естественной и многократной принудительной циркуляцией для исключения возможности образования накипей необходимо, чтобы концентрация солей в воде была ниже критической, при которой начинается их выпадение из раствора. С целью поддержания требуемой концентрации солей из котла продувкой выводится некоторая часть воды и вместе с ней удаляются соли в таком количестве, в каком они поступают с питательной водой. В результате продувки количество солей, содержащееся в воде, стабилизируется на допустимом уровне, исключающем их выпадение из раствора. Применяют непрерывную и периодическую продувки котла (сливка воды). Непрерывная продувка обеспечивает равномерное удаление из котла накопившихся растворенных солей и осуществляется из места наибольшей их концентрации в верхнем барабане. Периодическая продувка применяется для удаления шлама, осевшего в элементах котла, и производится из нижних барабанов и коллекторов котла через каждые 12-16 ч.

При непрерывной продувке котлов с одноступенчатой системой испарения вода непрерывной продувки отбирается из барабана по продольной трубе с отверстиями и подается в расширитель, где поддерживается давление меньшее, чем в котле. В результате часть продувочной воды испаряется и образовавшийся пар поступает в деаэратор. Оставшаяся в расширителе вода удаляется через теплообменник и после ее охлаждения сливается в дренажную систему.

Непрерывная продувка  $p$ , %, устанавливается по допустимой концентрации в воде котла растворимых примесей, чаще всего по общему солесодержанию, и выражается в процентах паропроизводительности котла:  $p = D_{пр}/(D \cdot 100)$ , где  $D_{пр}$  и  $D$  - расходы продувочной воды и номинальная паропроизводительность котла, кг/ч. Расход питательной воды  $D_{пв}$  (кг/ч) при наличии непрерывной продувки составляет:  $D_{пв} = D + D_{пр}$ .

Количество воды, удаляемое непрерывной продувкой, устанавливается из уравнения солевого баланса котла:



$$D_{\text{пв}}S_{\text{пв}} = DS_{\text{п}} + D_{\text{пр}}S_{\text{пр}} + DS_{\text{отл}},$$

где  $S_{\text{пв}}$ ,  $S_{\text{п}}$  и  $S_{\text{пр}}$  - солесодержания питательной воды, пара и продувочной воды, кг/кг;  $S_{\text{отл}}$  - количество веществ, отлагающихся на поверхностях нагрева, отнесенное к 1 кг получаемого пара, мг/кг.

В котлах низкого и среднего давления количество солей, уносимых паром, незначительно, и член  $DS_{\text{п}}$  можно приравнять нулю. Отложение солей на поверхностях нагрева при нормальном водном режиме котла не допускается, и член  $DS_{\text{отл}}$  в этом уравнении также должен быть равен нулю. Тогда количество воды, удаляемое с продувкой  $D_{\text{пв}}$ , и величина продувки  $p$ , %:  $D_{\text{пв}} = D_{\text{пр}} S_{\text{пв}}/S_{\text{пр}}$ ;  $p = 100S_{\text{пв}} / (S_{\text{пр}} - S_{\text{пв}})$ .

В котлах высокого давления уносом паром примесей вследствие растворимости в паре гидроксидов металлов и  $\text{SiO}_2$ , а также отложением их пренебрегать нельзя и величину продувки следует определять с учетом члена  $DS$  по формуле  $p = (S_{\text{пв}} - S_{\text{п}})/(S_{\text{пр}} - S_{\text{пв}})$ .

Применение непрерывной продувки, являющейся основным средством поддержания требуемого качества воды барабанного котла, связано с увеличением расхода питательной воды и тепловыми потерями. На каждый килограмм продувочной воды расходуется теплота, кДж/кг

$$q = (h_{\text{пр}} - h_{\text{пв}}) / \eta_{\text{к}},$$

где  $h_{\text{пр}}$  и  $h_{\text{пв}}$  - энтальпии продувочной и питательной воды, кДж/кг;  $\eta_{\text{к}}$  - КПД котла.

Правилами технической эксплуатации непрерывная продувка при питании котла смесью конденсата и обессоленной воды или дистиллята должна быть не более 0,5; при добавке к конденсату химически очищенной воды - не более 3; если потери пара, отбираемого на производство, превышают 40 % - не более 5 %. При указанных нормах продувки и частичном использовании теплоты продувочной воды потери теплоты с продувкой составляют 0,1-0,5 % теплоты топлива.

В целях уменьшения потерь теплоты с продувкой следует стремиться к уменьшению количества выводимой из котла воды. Эффективным методом

снижения продувки является ступенчатое испарение воды. Сущность ступенчатого испарения или ступенчатой продувки состоит в том, что испарительная система котла разделяется на ряд отсеков, соединенных по пару и разделенных по воде. Питательная вода подается только в первый отсек. Для второго отсека питательной водой служит продувочная вода из первого отсека. Продувочная вода из второго отсека поступает в третий отсек и т. д.

Продувку котла осуществляют из последнего отсека - второго при двухступенчатом испарении, третьего - при трехступенчатом испарении и т. д. Так как концентрация солей в воде второго или третьего отсека значительно выше, чем в воде при одноступенчатом испарении, для вывода солей из котла требуется меньший процент продувки. Применение ступенчатого испарения эффективно также как средство уменьшения уноса кремниевой кислоты вследствие высокой гидратной щелочности, возникающей в солевых отсеках. Системы ступенчатого испарения и продувки обычно выполняют из двух или трех отсеков. В настоящее время в большинстве барабанных котлов среднего и высокого давления применяется ступенчатое испарение. Повышение солесодержания воды при нескольких ступенях испарения происходит ступенями и в пределах каждого отсека устанавливается постоянным, равным выходному из данного отсека. При двухступенчатом испарении система делится на две неравные части — чистый отсек, куда подается вся питательная вода и вырабатывается 75-85% пара, и солевой отсек, где вырабатывается 25-15 % пара.

Применяют схему испарительной системы с двухступенчатым испарением с солевыми отсеками, расположенными внутри барабана котла, в его торцах, и схему с выносными циклонами, которые вместе с включенными в них экранами образуют солевые отсеки котла. При двухступенчатом испарении относительная суммарная паропроизводительность солевых отсеков, %, необходимая для обеспечения заданного солесодержания воды в чистом отсеке, при отсутствии переброса воды в него из солевых отсеков, определяется из выражения:

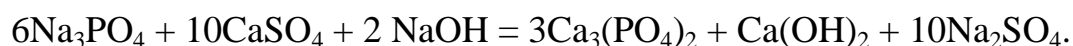
$$n_{\text{п}} \geq [(100 + p)S_{\text{пв}}/S_{\text{в1}}] - p_{\text{с}},$$

где  $n_{\text{п}}$  - паропроизводительность солевых отсеков, %;  $S_{\text{пв}}$  и  $S_{\text{в1}}$  - солесодержание

питательной воды и воды в чистом отсеке, кг/кг;  $p_c$  - продувка из солевого отсека, %. Оптимальная паропроизводительность солевых отсеков при двухступенчатом испарении и продувке, определяемой допустимым общим солесодержанием в паре, при продувке в 1 % равна 10-20 %, а при продувке в 5 % она составляет 10-30 %.

Избежать появления накипи на поверхностях нагрева барабанного котла только путем улучшения качества питательной воды и продувки котла не всегда удается. Дополнительно применяют коррекционный метод обработки воды в котле, при котором соли Ca и Mg переводят в соединения, нерастворимые в воде. Для этого вводят в воду реагенты —коррекционные вещества, анионы которых связывают и осаждают в виде шлама катионы кальция и магния.

В котлах при давлении более 1,6 МПа в качестве корректирующего реагента применяют тринатрийфосфат  $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$ . При введении этого реагента происходит реакция с кальциевыми и магниевыми соединениями:



Получившиеся вещества -  $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$ ,  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  - обладают малой растворимостью и выпадают в виде шлама, удаляемого периодической продувкой. При питании котлов конденсатом с добавкой химически очищенной воды создают фосфатно-щелочной режим, при котором сохраняется свободная щелочность. При добавке к конденсату дистиллята и химически обессоленной воды поддерживают чисто фосфатный режим при отсутствии свободной щелочности. Рекомендуется следующий избыток РО в воде: у котлов без ступенчатого испарения 5-15; у котлов со ступенчатым испарением в чистом отсеке 2-6 и в солевом отсеке - не более 50 мг/кг.

Для коррекции качества воды барабанных котлов с давлением выше 6,0 МПа в последнее время в ряде случаев в питательную воду дозируются либо аммиак с гидразином, либо комплексон.

При гидразинно-аммиачном водном режиме оставшийся после термической деаэрации кислород связывается гидразином. Остатки углекислоты связываются дозируемым в питательную воду аммиаком, который полностью нейтрализует

CO<sub>2</sub> и повышает pH среды до  $9,1 \pm 0,1$ , что способствует уменьшению скорости коррозии.

При комплексном водном режиме кроме аммиака и гидразина в питательную воду вводят [20] комплексон — обычно этилендиаминтетрауксусную кислоту (ЭДТК). Это приводит к повышению теплопроводности отложений и перемещению их в менее теплонапряженные поверхности (экономайзер). При 80-90°C водные растворы ЭДТК и аммиака образуют трехзамещенную аммонийную соль ЭДТК, которая, взаимодействуя с продуктами коррозии железа (при 110°C - гемеоксидом железа), образует хорошо растворимые в воде комплексонаты железа, которые под действием более высокой температуры по ходу среды разлагаются с образованием выпадающего на внутренней стороне труб плотного слоя магнетита, защищающего металл от коррозии.

В котлах высокого давления отложение солей начинается тогда, когда влагосодержание пара уменьшается до 50-20 %, и заканчивается при перегреве пара на 20-30 °C. Наибольшее отложение примесей происходит в области, где влажность пара менее 5-6 %.

Осевшие в трубах котла соли устраняют [21] в периоды остановки водной и кислотной промывкой. Водную промывку осуществляют при очередной остановке котла водой с температурой 100 °C. Кислотная промывка производится через каждые 2-3 года слабым раствором хромовой или соляной кислоты.

### **6.5. Сепарация и промывка пара. Требования к пару**

В насыщенном водяном паре могут находиться различные примеси: газы N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, соли и кислоты минеральных и органических веществ, оксиды металлов, взвешенные или растворенные в паре.

Минеральные примеси могут отлагаться в трубах пароперегревателя, в арматуре паропроводов и в проточной части турбины в количестве, недопустимом для их нормальной работы. К качеству насыщенного пара барабанных котлов предъявляются жесткие требования, установленные на основе опыта эксплуатации оборудования и данных теплехимических испытаний. Предельными

нормами качества пара для барабанных котлов соответственно при давлениях  $P_6$  (МПа) – до 4; 4-10 и более 10, являются: соединения натрия в пересчете на Na – 60; 15 и 10 мкг/кг; кремниевая кислота в пересчете на  $\text{SiO}_2$  – 15 и 15 мкг/кг; диоксид углерода – 10-15 мкг/кг.

Загрязняющие примеси поступают в насыщенный пар в основном из питательной воды. Содержание продуктов коррозии при нормальных условиях незначительно. В прямоточных котлах высокого и сверхвысокого давления определяющее значение в загрязнении пара имеют растворенные в нем минеральные неорганические примеси, в основном  $\text{SO}_2$ , оксиды Fe и Si, а также соединения натрия.

Соотношение между минеральными примесями, выносимыми с паром и остающимися в воде при докритическом давлении, характеризуется коэффициентом распределения:  $K_p = C_{\text{п}}/C_{\text{в}}$ , где  $C_{\text{п}}$  и  $C_{\text{в}}$  - содержания минеральных примесей в паре и воде, мкг/кг.

Коэффициент распределения зависит от химического состава минеральных веществ, так как растворение примесей происходит избирательно и повышается с увеличением давления и температуры пара. Некоторые из вынесенных паром примесей откладываются затем на испарительных поверхностях или в турбине.

Таким образом, в прямоточных котлах качество насыщенного пара определяется только характеристикой питательной воды. В котлах с естественной и многократной принудительной циркуляцией отделение пара от воды происходит в барабане. В котлах низкого и среднего давления загрязнение насыщенного пара происходит преимущественно вследствие выноса вместе с паром капель воды, содержащих минеральные примеси. При высоком давлении пара и его незначительной влажности выносятся растворенные в нем примеси, в основном соединения кремния, гидроксиды металлов.

В общем случае содержание минеральных нелетучих примесей в насыщенном паре, мкг/кг:  $C_{\text{п}} = 0,01(d + K_p)C_{\text{в}}$ , где  $d$  - влажность пара, %, обычно  $d = 0,01-0,03$  %;  $K_p$  - коэффициент распределения примесей за счет растворимости между паром и водой.

При низких и средних давлениях содержание минеральных примесей в паре практически определяется только их содержанием в находящейся в барабане воде и влажностью пара, так как  $(d + K_p) \approx d$ .

### 6.6. Образование капель воды и унос их паром

В барабане котла при вводе пароводяной смеси под уровень воды происходит ее дробление и образование крупных и мелких капель. Дробление воды происходит за счет затраты части кинетической энергии всплывающих на ее поверхность пузырей пара и за счет освобождения части энергии поверхностного натяжения при разрыве водных оболочек пузырей. При переходе из водяного объема в паровую скорость паровых пузырей уменьшается, так как увеличивается доля сечения, занимаемая паром в области от  $\varphi_{\text{стаб}}$  до 1. При этом разность кинетических энергий (за 1 с) потоков пара в водяном и паровом объеме барабана составляет:

$$\Delta E_k = w_o^3 \cdot \rho'' \cdot F (1 - \varphi_{\text{стаб}})^2 / 2 \varphi_{\text{стаб}}^2,$$

где  $F$  - площадь поверхности зеркала испарения,  $\text{м}^2$ ;  $\varphi_{\text{стаб}}$  - объемное паросодержание в стабилизированном водяном участке.

Энергия поверхностного натяжения, освобождающаяся при разрыве паровых пузырьков за то же время, составляет:

$$\Delta E_\sigma = \sigma \pi d_{\text{пуз}}^2 \cdot n [1 - m(d_{\text{кап}}/d_{\text{пуз}})^2],$$

где  $d_{\text{пуз}}$  и  $d_{\text{кап}}$  - средние диаметры паровых пузырей и водяных капель,  $\text{м}$ ;  $\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения пленки,  $\text{Па/м}$ ;  $n$  и  $m$  - числа паровых пузырей и водяных капель, образующихся при разрушении одного парового пузыря.

При обычно принятых небольших приведенных скоростях пара через слой воды при низком ( $0,3-0,5$  м/с) и при высоком давлении ( $0,1-0,2$  м/с) отношение  $\Delta E_k / \Delta E_\sigma$  составляет соответственно около  $10^3$  и  $10^2$  и, следовательно, образование мелких капель жидкости происходит в основном за счет поверхностного натяжения, освобождающегося при разрыве оболочек паровых пузырей, упрочняющихся при наличии растворенных или взвешенных в воде веществ. Образовавшиеся на поверхности зеркала испарения капли за счет их

кинетической энергии будут подпрыгивать на высоту  $l_{\text{под}}$ . Если высота подпрыгивания капель больше высоты парового пространства барабана, то капли могут быть унесены из него потоком пара. Если  $l_{\text{под}} < l_{\text{действ}}$ , то такие капли выпадают обратно из потока пара в водяной объем барабана. Если относительная скорость капли равна скорости ее витания  $w_{\text{вит}}$ , то высота подъема капли будет неограниченно большой.

После того как начальная скорость капли перестанет оказывать влияние на ее движение, вертикальная составляющая стабилизированной скорости движения капли в восходящем потоке пара  $w_{\text{ун}} = w'' - w_{\text{вит}}$ , где  $w''$  - скорость пара. Если  $w_{\text{вит}} > w''$ , то капля при отсутствии устройств для ее задержания будет унесена потоком пара из парового пространства барабана; если  $w_{\text{вит}} < w''$ , то капля упадет на зеркало испарения. При давлении 10 МПа, достаточной высоте парового пространства барабана  $l_{\text{под}} < l_{\text{действ}}$  и подъемной скорости пара  $w''_0 = 0,1$  м/с потоком пара будут транспортироваться капли размером меньше 0,1 мм. Из приведенной характеристики образования капель влаги и выноса их потоком пара следует, что влажность пара зависит от нагрузки зеркала испарения и парового объема барабана, физических характеристик воды и пара, а также солесодержания воды. Зависимость влажности пара от его подъемной скорости определяется выражением:  $w = A(w''_0)^n$ , где  $A$  - коэффициент, зависящий от физических свойств воды и пара, а также от солесодержания воды.

Подъемная скорость пара пропорциональна нагрузке зеркала испарения и нагрузке объема парового пространства барабана, т. е. значению  $R_S = D/F$  или  $R_V = D/V$ , где  $D$  - нагрузка котла;  $F$  и  $V$  - площадь зеркала испарения и объем парового пространства барабана. Поэтому зависимость влажности пара от  $w''_0$ ,  $R_S$  и  $R_V$  идентичны, следовательно:  $w = A(R_S)^n$ .

Влажность пара, характеризуемая коэффициентом уноса, зависит от нагрузки парового объема барабана (или от уровня в водоуказательном стекле до точки выхода пара) и рабочего давления в барабане. При малых нагрузках повышение влажности происходит медленно и  $n < 2$ . С ростом нагрузки влажность пара интенсивно увеличивается и  $n$  возрастает до 2-4. Дальнейшее увеличение

нагрузки приводит к резкому увеличению  $n = 8-12$  и влажности. Повышение давления увеличивает транспортирующую способность пара и долю мелких капель влаги в паре. В результате влажность пара при той же нагрузке будет больше, чем при меньшем давлении.

С увеличением  $l_{\text{действ}}$  влажность пара сначала резко уменьшается, а затем уменьшение влажности замедляется. При умеренных значениях  $R_s = 800-1000 \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$  увеличение  $l_{\text{действ}}$  более чем на  $0,8-1 \text{ м}$  не дает существенного уменьшения влажности пара. Существенное влияние на влажность пара оказывает солесодержание воды. Это связано с уменьшением действительной высоты парового пространства барабана вследствие набухания водяного объема при увеличении солесодержания воды, а также повышения доли мелкодисперсных капель влаги, транспортируемых паром. С увеличением влажности пара возрастает и коэффициент уноса солей, равный отношению солесодержания пара к солесодержанию воды:  $K = S_{\text{п}}/S_{\text{в}}$ . При увеличении солесодержания воды  $S_{\text{в}}$  до некоторого критического значения солесодержание пара увеличивается пропорционально  $S_{\text{в}}$  и коэффициент уноса  $K$  остается постоянным. При критическом солесодержании воды наблюдается резкое увеличение солесодержания пара и коэффициента уноса. Критическое солесодержание зависит от давления и состава взвешенных и растворенных в воде веществ. С ростом давления критическое солесодержание воды уменьшается.

### **6.7. Способы сепарации капельной влаги**

В барабанных котлах для улучшения качества насыщенного пара необходимо уменьшить содержание в нем капельной влаги и растворенных в паре веществ. При низких и средних давлениях решающее значение для уменьшения солесодержания пара имеет сепарация капельной влаги от пара. В котлах высокого и сверхкритического давления солесодержание пара определяется также содержанием в паре растворенных примесей. Уменьшение содержания в паре капельной влаги достигается в барабане котла равномерным распределением по длине и диаметру барабана пароводяной и паровой нагрузки, а также отделением капель влаги от пара с помощью сепарационных устройств.



В современных барабанных котлах применяются [22] в отдельности или в различных сочетаниях различные сепарационные устройства, схемы которых показаны на рисунке 3.

Сепарационные устройства должны погасить кинетическую энергию поступающей в барабан пароводяной смеси с минимальным образованием мелкодисперсных капель влаги, обеспечить равномерное распределение паровой нагрузки по площади зеркала испарения и потока пара в объеме барабана, осуществить выделение из потока пара капель влаги.

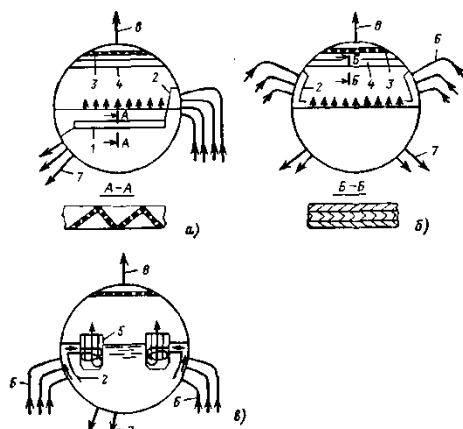


Рисунок 3. Схемы сепарационных устройств в барабане котла: а – при вводе пароводяной смеси под уровень воды в барабане; б – при подводе пароводяной смеси в паровой объем барабана; в – при установке внутрибарабанных циклонов;

1 – распределительный дырчатый утопленный щит; 2 – отбойный щит; 3 – пароприемный щит; 4 – жалюзийный сепаратор; 5 – внутрибарабанный циклон; 6 – трубы испарительной поверхности нагрева; 7- опускные трубы; 8 – паровыводящие трубы

В сепарационных устройствах используются следующие принципы сепарации капель влаги из пара.

#### 6.7.1. Гравитационная сепарация

Отделение капель влаги от пара осуществляется при горизонтальном и вертикальном подъемном движении пара со стабилизированной малой скоростью. Эффективность гравитационной сепарации пропорциональна разности плотности воды и пара, т. е. зависит от давления, а также размеров капель воды, скорости

потока пара и длины его пути до выхода из барабана.

При давлениях пара 1,6-15,5 МПа и соответствующих им напряжениях парового пространства барабана в диапазоне 3000-150 м<sup>3</sup>/(м<sup>3</sup>·ч) и скорости подъемного движения пара над зеркалом испарения 0,9-0,05 м/с крупные капли влаги выпадают из потока на зеркало испарения и в паре остаются частицы менее 50 мкм. Данный принцип сепарации используется, например, в устройстве, показанном на рисунке 3, а. Гашение кинетической энергии струи пароводяной смеси и равномерное распределение пара происходят в водяном объеме. Отделение капелек влаги от пара осуществляется в паровом пространстве. Гравитационная сепарация имеет место практически в той или иной мере при всех конструкциях внутрибарабанных устройств.

#### *6.7.2. Инерционная сепарация*

Отделение более крупных капель воды от пара может быть осуществлено при резком ускорении горизонтального или вертикального потока пара и последующем уменьшении его скорости, а также за счет центробежных сил, действующих на каплю при изменении направления движения или направления закручивания потока влажного пара. Инерционный принцип сепарации используется в различных конструкциях сепарационных устройств. Простейшим инерционным сепаратором являются глухие или дырчатые стальные листы, размещенные вертикально или наклонно, которые одновременно используются для гашения кинетической энергии пароводяной смеси и отделения основной массы воды от пара (схема на рисунке 3, б). Скорость пароводяной смеси на входе под отбойный щит не должна превышать 2-2,5 м/с. Скорость пара на выходе из под щита в барабан принимается обычно 0,7-1 м/с. Применяемые для равномерного распределения пара по площади зеркала испарения дырчатые щиты устанавливаются примерно на 75-100 мм ниже нижнего уровня воды в барабане. Минимальная скорость пара в отверстиях щита размером 8-12 мм должна быть 0,95 м/с при 4 МПа и 0,5 м/с при 10 МПа.

В **жалюзийном сепараторе** (рисунок 3, б) для инерционного отделения капель воды используется изменение ускорения потока в сепараторе и на выходе

из него, а также многократное изменение его направления, что повышает эффективность сепарации. Предельная скорость пара перед горизонтальным жалюзийным сепаратором 0,5 м/с при 4 МПа и 0,2 м/с при 10 МПа. Если жалюзи вертикальны или наклонены под большим углом, скорость пара может быть в 1,5-2 раза больше.

**Центробежный сепаратор** циклонного типа, в котором происходит интенсивное закручивание потока влажного пара, показан на схеме рисунке 3, в. Циклонные сепараторы обеспечивают эффективное отделение капель влаги за счет действия на них центробежных сил, отбрасывающих капли к стенке циклона, где они задерживаются на пленке воды, стекающей на зеркало испарения. Циклонные сепараторы выполняются внутрибарабанными при концентрированном подводе пароводяной смеси с большой скоростью в водяной объем барабана, а также выносными, в том числе для сепарации пара из второй и третьей ступеней испарения.

Эффективность улавливания капель влаги определяется тангенциальной скоростью входа пароводяной смеси в циклон  $u$  и осевой скоростью подъема потока в циклоне  $w_0$ . С уменьшением отношения  $u/w_0$  эффективность работы циклона резко уменьшается, поэтому  $u/w_0$  должно быть не меньше пяти.

Внутрибарабанные циклоны обычно имеют высоту корпуса 400-500 мм. Осевая скорость пара в циклоне при давлении 4 МПа обычно  $w_0 = 0,6-0,7$  м/с, при 10 МПа  $w_0 = 0,3-0,4$  м/с. Допускаемая паропроизводительность циклона при диаметре 420 мм и давлении пара 4 МПа составляет 6,3-7,5 т/ч, а при 10 МПа она равна 10-13 т/ч.

Гидравлическое сопротивление внутрибарабанного циклона, Па, определяется по формуле

$$\Delta p_{\text{ц}} = 0,5 \xi u_{\text{см}} \rho' \{1 + (u_0''/u_0)[1 - (\rho''/\rho')]\},$$

где  $u_{\text{см}}$ ,  $u_0$  и  $u_0''$  - скорость смеси, приведенные скорости воды и пара, м/с;  $\rho'$  и  $\rho''$  - плотности воды и пара, кг/м<sup>3</sup>;  $\xi$  - коэффициент местного сопротивления. При соотношении сечений на входе смеси и на выходе воды из лопаток 2:1 для подводящих патрубков  $\xi = 4,5$ ; для выхода из подводящего патрубка в циклон и

выхода воды в барабан  $\xi = 1,2$ .

### *6.7.3. Пленочная сепарация*

Пленочная сепарация основана на использовании способности налипания мелких капель воды, не обладающих инерционными свойствами, на увлажненную развитую поверхность при соприкосновении с ней потока влажного пара. При ударе потока влажного пара о такую поверхность в результате слияния мелких капель на ней образуется сплошная водяная пленка, которая достаточно прочна и не срывается паром, но в то же время беспрепятственно и непрерывно дренируется в водяное пространство барабана.

Пленочная сепарация используется в циклонных, а также в швеллерковых сепараторах. В них пленочная сепарация сочетается с инерционной за счет отбрасывания более крупных капель воды при прохождении влажного пара по каналам между швеллерами с четырехкратным поворотом на  $90^\circ$ . Такая конструкция достаточно эффективно отделяет мелкие капли от пара. Допускаемая скорость пара в швеллерковых сепараторах при давлении в барабане 11 МПа - 0,2 м/с.

Для равномерного отвода пара по сечению барабана на выходе из него устанавливается пароприемный дырчатый щит. Скорость в отверстиях щита выбирается из условия:  $0,5w_0^2 \cdot \rho_n = 200-250$  Па, где  $\rho_n$  - плотность насыщенного пара, кг/м<sup>3</sup>.

Для создания достаточного дросселирующего эффекта щита скорость пара в его отверстиях должна быть в 2 раза больше, чем продольная скорость пара в барабане.

### *6.7.4. Промывка пара*

Механические способы сепарации позволяют удалить из пара относительно крупные частицы. От веществ, находящихся в паре высокого давления в виде молекулярных и коллоидных растворов, пар может быть очищен промывкой его чистой водой. Практически промывка пара осуществляется пропуском его через слой воды.

На рисунке 4 показано устройство для промывки пара. В паровом

пространстве барабана размещается щит, на который подается питательная вода, стекающая затем в водяное пространство барабана. Щит выполняется в виде системы корыт или с перфорированными по его площади отверстиями.

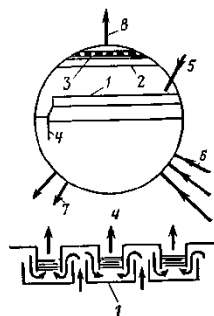


Рисунок 4. Схема сепарационного устройства с промывкой пара: 1 – щит с промывочными корытцами; 2 – жалюзийный сепаратор; 3 - пароприемный щит; 4 – распределительный щит; 5 – подвод питательной воды; 6 – трубы испарительной поверхности нагрева; 7 – опускные трубы; 8 - паровыводящие трубы

Пар, проходя сквозь слой воды в корытах или через отверстия в щите, частично очищается от солей, насыщая ими воду. Основной целью промывки пара при высоком давлении является снижение уноса кремниевой кислоты. В установившемся состоянии кремнесодержание пара становится пропорциональным кремнесодержанию воды, контактирующей с паром. Коэффициент распределения кремнесодержания в паре и воде выражается отношением  $K_p = \frac{(SiO_2^{2-})_п}{(SO_2^{2-})_п.в.}$ , которое определяет допустимое кремнесодержание питательной воды при заданном допустимом кремнесодержании в паре.

При промывке пара вследствие несовершенства его контакта с водой примеси удаляются не полностью; конечное солесодержание пара определяется по формуле  $S_п = (1 - \beta) K_p + S_{пром} + \beta K_{пр} S_{пр}$ , где  $\beta$  - коэффициент проскока - доля пара, прошедшего через промывочное устройство, но не промытого;  $S_{пром}$  и  $S_{пр}$  - солесодержания промытой и непромытой частей пара.

Коэффициент проскока всех примесей составляет примерно 10-15, а кремниевой кислоты 15-40 %. Для удовлетворительной работы промывочного устройства слой воды на щите должен быть 60-70 мм. На промывочный щит

подают не более 50 % питательной воды в целях уменьшения конденсации пара в барабане, которая вызывает необходимость повышения паросодержания в испарительных поверхностях нагрева. Для уменьшения выноса капельной влаги в питательную воду, находящуюся на щите, необходимо иметь достаточную высоту парового пространства под щитом.

В прямоточном котле с промывочно-сепарационным устройством промывка пара осуществляется путем впрыска воды в слегка перегретый пар с доведением его влажности до 2 %. При этом примеси, имеющиеся в паре, растворяются в воде. Далее влага отделяется от пара в центробежном сепараторе и после использования части ее тепла выводится в дренаж.

## **6.8. Загрязнение и очистка наружных поверхностей нагрева**

### *6.8.1. Шлакование поверхностей нагрева*

В процессе работы котла возникает загрязнение внешних поверхностей нагрева. При условии  $T_g/T_{пл} < 1$  основная часть уноса за топкой находится в твердом состоянии ( $T_g$  - температура газов,  $T_{пл}$  - температура плавления золы). На экранах и ширмах топки, работающей на пылевидном твердом топливе, возможны отложения шлака. Эти отложения образуются при температуре газов на выходе из топки более высокой, чем температура размягчения золы, а также в высокотемпературных зонах топки при неудовлетворительной аэродинамической организации топочного процесса в тех случаях, когда расплавленные частицы золы, не успевшие охладиться и затвердеть, набрасываются потоком газов на стенки топок и трубы экранов. Обычно шлакование начинается в промежутках между экранными трубами, а также в застойных зонах и участках топки. Если температура топочной среды в зоне образования шлаковых отложений ниже температуры начала деформации золы  $t_1$ , то наружный слой шлака состоит из отвердевших частиц. При повышении температуры наружный слой шлака может оплавляться, что способствует налипанию новых частиц и прогрессирующему шлакованию. При температуре окружающей среды выше точки начала жидкоплавкого состояния  $t_3$  наружный слой шлака будет оплавляться и дальнейшего его нарастания не будет, так как шлак будет стекать со стенок топки.

В таком режиме работают ошипованные экраны топок с жидким шлакоудалением.

Шлакование уменьшает тепловосприятие поверхностей нагрева, расположенных в топке, и повышает температуру продуктов сгорания на выходе из топки, что может привести к нарушению нормального гидродинамического режима работы экранов и ширм. В области пароперегревателя, если температура газов ниже  $t_1$ , имеют место уплотненные отложения твердых частиц золы. Прочные отложения образуются при наличии в золе топлива свободной извести  $\text{CaO}$ , которая, соединяясь с  $\text{SO}_2$ , образует сульфат кальция, связывающий между собой и поверхностью труб частицы золы.

В экономайзере образуются рыхлые сыпучие отложения мелких фракций золы, причем рост загрязняющего слоя сопровождается разрушением его более крупными частицами, в результате чего устанавливается динамическое равновесие и состояние загрязняющего слоя приобретает постоянный характер.

В зоне низких температур могут образовываться липкие связанные отложения. Переход от сыпучих к вязким отложениям в области низких температур, где может иметь место конденсация влаги, по-видимому, связан с тем, что в результате смачивания золы появляющейся серной кислотой образуется гипс — вещество с вяжущими свойствами.

Отложения золы на конвективных поверхностях нагрева образуются в основном на кормовых поверхностях труб, а при малых скоростях потока — и на лобовых их поверхностях. Более крупные частицы золы оседают на лобовых поверхностях, более мелкие, огибая трубы и попадая в вихревую зону, оседают на кормовых поверхностях.

Количество отложений на конвективных поверхностях нагрева зависит от скорости потока продуктов сгорания, геометрических характеристик поверхности нагрева и физических свойств золы. Число соприкосновений с трубами мелких частиц увеличивается прямо пропорционально скорости потока, а разрушающие действия крупных частиц растут пропорционально кубу этой скорости. В итоге с увеличением скорости потока динамическое равновесие между процессами

оседания золы и разрушения осевшего ее слоя наступает при меньших его размерах.

На рисунке 5 показана зависимость коэффициента загрязнения от скорости потока.

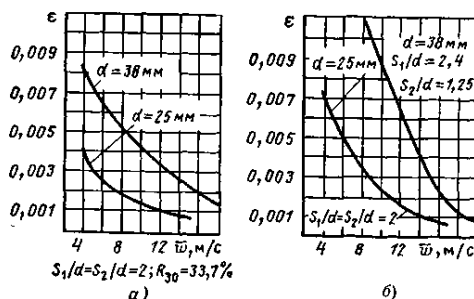


Рисунок 5. Зависимость коэффициента загрязнения поверхности нагрева от скорости газа и конструкции пучка труб: а) – шахматный; б) – коридорный

Существенно влияют на загрязнение труб их диаметр, шаг между трубами, а также порядок их расположения — коридорный или шахматный. Уменьшение диаметра труб и продольного шага в трубных шахматных пучках значительно уменьшает их загрязнение. В коридорных пучках труб загрязнение больше, чем в шахматных.

Уменьшение размера частиц золы повышает загрязнение конвективных поверхностей нагрева. Однако частицы с размером менее 20 мкм практически не оседают на трубах. Крупные частицы золы оказывают разрушающее влияние на слой отложений золы.

Зольность топлива не влияет на толщину загрязнений. По достижении ими определенных пределов зола больше не осаждается на загрязненных трубах. Толщина липких загрязнений в области низких температур зависит от  $A^p$  и характеристик золы и прогрессирует во времени. Вследствие загрязнения конвективных поверхностей нагрева ухудшаются условия теплопередачи и возрастают их аэродинамические сопротивления. В результате повышается температура уходящих газов, увеличиваются потери  $q_2$  и расход электроэнергии на тягу. Для нормальной и надежной работы котлов необходимо поверхности нагрева поддерживать чистыми [22].



### *6.8.2. Очистка наружных поверхностей нагрева от загрязнений*

В процессе эксплуатации котла для очистки экранных поверхностей нагрева применяют паровую и пароводяную обдувку, а также вибрационную очистку. Для конвективных поверхностей нагрева используют паровую и пароводяную обдувку, вибрационную, дробевую и акустическую очистку или самообдувку. Наибольшее распространение имеют паровая обдувка и дробевая очистка. Для ширм и вертикальных пароперегревателей наиболее эффективной является вибрационная очистка. Радикальным является применение самообдувающихся поверхностей нагрева с малым диаметром и шагом труб, при которых поверхности нагрева непрерывно поддерживаются чистыми. Эффективность очистки поверхностей нагрева с помощью указанных устройств определяется коэффициентом изменения аэродинамического сопротивления газового тракта котла  $\varepsilon = \Delta P_k / \Delta t$  и изменения его тепловой мощности  $\varphi = \Delta Q / \Delta t$ , где  $\Delta P_k$  - увеличение сопротивления газового тракта котла, Па;  $\Delta Q$  - уменьшение тепловой мощности котла, кВт;  $\Delta t$  - период между очистками, ч. Увеличение коэффициентов  $\varepsilon$  и  $\varphi$  указывает на необходимость уменьшения периода времени между очистками.

### *6.8.3. Паровая обдувка*

Очистка поверхностей нагрева от загрязнения может производиться за счет динамического воздействия струй воды, пара, пароводяной смеси или воздуха. Действенность струй определяется их дальностью. Зависимость относительной скорости струи при данном давлении от относительного ее расстояния применительно к воздуху, пару, пароводяной смеси выражается формулой

$$(\omega_1/\omega_2) = f(l/d_2),$$

где  $\omega_1$  и  $\omega_2$  скорости на расстоянии  $l$  от сопла и на выходе из него;  $d_2$  - выходной диаметр сопла.

Наибольшей дальностью и термическим эффектом, способствующим растрескиванию шлака, обладает струя воды. Однако обдувка водой может вызвать переохладение труб экранов и повреждение их металла.

Воздушная струя имеет резкое снижение скорости, создает небольшой динамический напор и эффективна только при давлении не менее 4 МПа. Применение воздушной обдувки затруднено необходимостью установки компрессоров высокой производительности и давления.

Наиболее распространена обдувка с применением насыщенного и перегретого пара. Струя пара имеет небольшую дальность, но при давлении более 3 МПа ее действие достаточно эффективно. Давление у обдуваемой поверхности  $p$  (Па) определяется по формуле:

$$P = w_i^2 / 2v_i,$$

где  $w_i$ ,  $v_i$  - осевая скорость и удельный объем обдувочной среды на расстоянии  $l$  от сопла. При давлении пара 4 МПа перед обдувочным аппаратом давление струи на расстоянии примерно 3 м от сопла составляет более 2000 Па.

Для удаления отложений с поверхности нагрева давление струи должно составлять примерно 200-250 Па для рыхлых золовых отложений; 400-500 Па для уплотненных золовых отложений; 2000 Па для оплавленных шлаковых отложений. Расход обдувочного агента для перегретого и насыщенного пара  $G$ , кг/с:

$$G = c\mu d_k^2 (p_1/v_1)^{0,5},$$

где  $c = 519$  для перегретого пара,  $c = 493$  для насыщенного пара;  $\mu = 0,95$ ;  $d_k$  - диаметр сопла в критическом сечении, м;  $p_1$  - начальное давление, МПа;  $v_1$  - начальный удельный объем пара, м<sup>3</sup>/кг.

Аппарат для паровой обдувки топочных экранов показан на рисунке 6. В качестве обдувающего агента в этом устройстве и аппаратах аналогичной конструкции можно использовать пар при давлении до 4 МПа и температуре до 400°C. Аппарат состоит из обдувочной трубы для подвода пара и механизма привода.

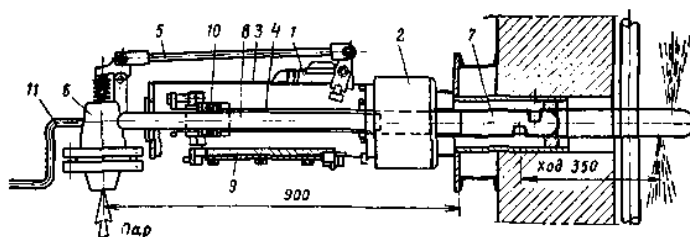


Рисунок 6. Аппарат для паровой обдувки экранов: 1 – электродвигатель; 2 – редуктор; 3 – корпус; 4 – шпindel; 5 – рычажной механизм; 6 – клапан; 7 – сопловая головка с двумя соплами; 8 – центральная неподвижная труба; 9 – направляющая; 10 – сальник; 11 – рукоятка

Вначале обдувочной трубе сообщается поступательное движение. Когда сопловая головка вдвигается в топку, труба начинает вращаться. В это время открывается автоматически паровой клапан и пар поступает к двум диаметрально расположенным соплам. После окончания обдувки электродвигатель переключается на обратный ход и сопловая головка возвращается в исходное положение, что предохраняет ее от чрезмерного нагрева. Зона действия обдувочного аппарата до 2,5, а глубина захода в топку до 8 м. На стенках топки обдувочные аппараты размещаются так, чтобы зона их действия охватывала всю поверхность экранов.

Обдувочные аппараты для конвективных поверхностей нагрева имеют многосопловую трубу, не выдвигаются из газохода и только вращаются. Число сопл, расположенных с двух сторон обдувочной трубы, соответствует числу труб в ряду обдуваемой поверхности нагрева.



Рисунок 7. Невыдвижные аппараты паровой обдувки

Для котлов ДКВр применяют невыдвижные аппараты паровой обдувки вращающиеся вручную (рисунок 8).

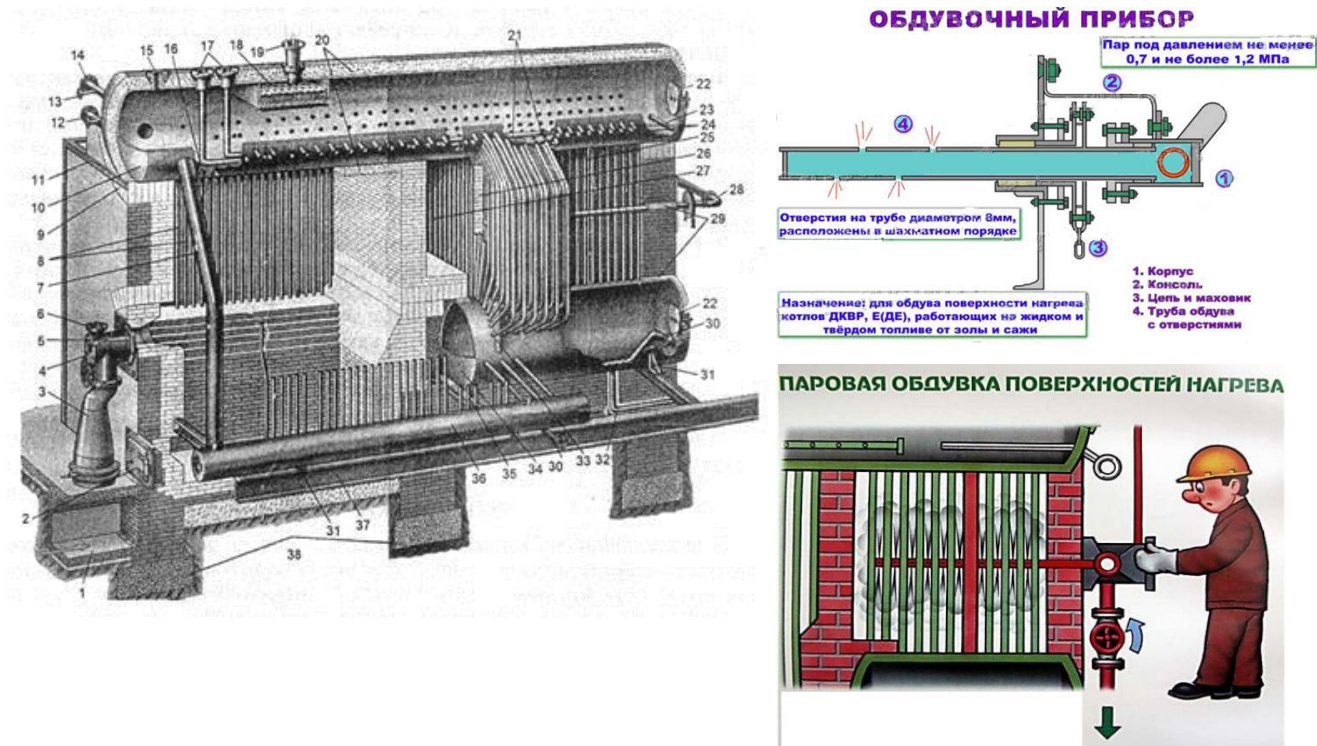


Рисунок 8. Паровой котел ДКВр-4-13. 1 - кораб подвода воздуха; 2 - дверца топки; 3 - воздуховод; 4 - фланец форсунки; 5 - горелка; 6 - фланец воздуховода острого дутья; 7 - опускная труба; 8 - экранные трубы; 9 - обмуровка котла; 10 - верхний барабан котла; 11 - каркас обмуровки; 12 – труба к водоуказательным приборам котла; 13 - фланец водомерного стекла; 14 – фланец сигнализатора предельного уровня; 15 - патрубок предохранительного клапана; 16 - контрольная пробка; 17 - патрубок подвода питательной воды; 18 – сепарирующие устройства; 19 - патрубок отвода пара; 20 - теплоизоляция котла; 21 - питательные трубы; 22 - лазовый затвор барабана котла; 23 - труба непрерывной продувки; 24 – трубы конвективного пучка; 25 - чугунная перегородка; 26 - кирпичная перегородка; 27 - камера догорания; **28 - обдувочный прибор**; 29 - асбестовые шнуры; 30 - труба периодической продувки; 31 - подвижная опора котла; 32 - дренажная труба; 33 - опора кирпичной перегородки; 34 - нижний барабан котла; 35 - неподвижная опора котла; 36 - коллектор экрана; 37 - опорная рама; 38 - фундамент котла

Для регенеративных воздухоподогревателей применяются обдувочные аппараты с качающейся трубой. Пар или вода подводится к обдувочной трубе, и вытекающая из сопла струя очищает пластины воздухоподогревателя. Обдувочная труба поворачивается на определенный угол так, что струя попадает во все ячейки вращающегося ротора воздухоподогревателя. Для очистки

регенеративного воздухоподогревателя котлов, работающих на твердом топливе, в качестве обдувочного агента применяется пар, а котлов, работающих на мазуте, — щелочная вода. Вода хорошо промывает и нейтрализует сернокислотные соединения, имеющиеся в отложениях.

#### 6.8.4. Пароводяная обдувка

Рабочим агентом обдувочного аппарата служит вода котла или питательная вода. Аппарат представляет собой сопла, установленные между трубами экранов.

Вода в сопла подается под давлением, и в результате падения давления при прохождении через сопла из нее образуется пароводяная струя, направленная на противоположно расположенные участки экранов, фестонов, ширм. Большая плотность пароводяной смеси и наличие недоиспарившейся в струе воды оказывают эффективное разрушающее действие на отложения шлака, который удаляется в нижнюю часть топки. В качестве устройств для пароводяной обдувки служат аппараты, представленные на рисунке 9.

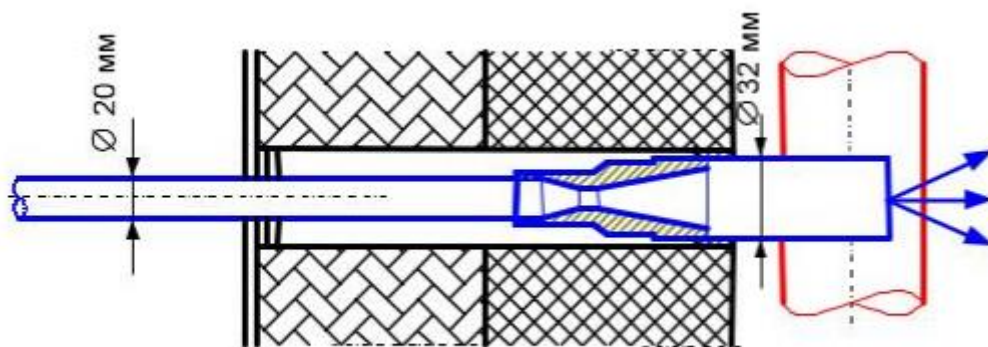


Рисунок 9. Аппарат для пароводяной обдувки

Благодаря большой дальности, до 6 м, аппараты, представляющие собой сопла Лавая с критическим диаметром 4—7 мм, можно устанавливать неподвижно в газоходах, где температура не выше 750° С. Прибор имеет обдувочные сопла, расположенные по обе стороны вращающейся трубы, по которой подводится парк соплам. Количество сопел и их шаг соответствуют поперечному шагу труб в обдуваемом пучке. Работа на питательной воде выше. Кроме того, не всегда возможно использование парогенераторной воды, как,

например, у прямоточных бесепараторных парогенераторов.

#### 6.8.5. Вибрационная очистка

Вибрационная очистка основана на том, что при колебании труб с большой частотой нарушается сцепление отложений с металлом поверхности нагрева. Наиболее эффективна вибрационная очистка свободно подвешенных вертикальных труб - ширм и пароперегревателей. Для вибрационной очистки преимущественно применяют электромагнитные вибраторы (рисунок 10).

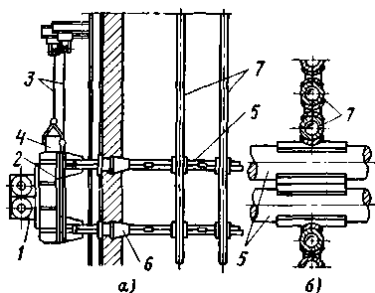


Рисунок 10. Вибрационное устройство для очистки вертикальных труб: а) – вид сбоку; б) – сопряжение виброштанги с обогреваемыми трубками – вид сверху; 1 – вибратор; 2 – плита; 3 – трос; 4 – противовес; 5 – виброштанга; 6 – уплотнение прохода штанги через обмуровку; 7 – труба

Трубы пароперегревателей и ширм прикрепляют к тяге, которая выходит за пределы обмуровки и соединяется с вибратором. Тяга охлаждается водой, и место ее прохода через обмуровку уплотнено. Электромагнитный вибратор состоит из корпуса с якорем и каркаса с сердечником, закрепленных пружинами. Вибрация очищаемых труб осуществляется за счет ударов по тяге с частотой 3000 ударов в минуту, амплитуда колебаний 0,3-0,4 мм.

#### 6.8.6. Дробеочистка

Данный способ применяется для очистки конвективных поверхностей нагрева при наличии на них уплотненных и связанных отложений. Очистка происходит в результате использования кинетической энергии падающих на очищаемые поверхности чугунных дробин диаметром 3-5 мм. Схема устройства для дробеочистки показана на рисунке 11.

В верхней части конвективной шахты котла помещаются разбрасыватели,

которые равномерно распределяют дробь по сечению газохода. При падении дробь сбивает осевшую на трубах золу, а затем вместе с ней собирается в бункерах, расположенных под шахтой. Из бункеров дробь вместе с золой попадает в сборный бункер, из которого питатель подает их в трубопровод, где масса золы с дробью подхватывается воздухом и выносится в дробеуловитель, из которого дробь по рукавам вновь подается в разбрасыватели, а воздух вместе с частицами золы направляется в циклон, где происходит их разделение. Из циклона воздух сбрасывается в газоход перед дымососом, а зола, осевшая в циклоне, удаляется в систему золоудаления котельной установки.

Транспорт дробы осуществляется по всасывающей (рис. 77, а) или нагнетательной (рис. 77, б) схеме. При всасывающей схеме разрежение в системе создается паровым эжектором или вакуум-насосом. При нагнетательной схеме транспортирующий воздух подается в инжектор от компрессора. Для транспорта дробы необходима скорость воздуха 40-50 м/с.

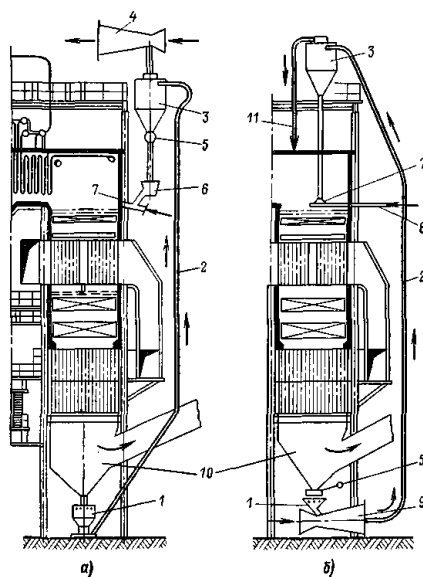


Рисунок 11. Схемы дробеочистных установок: а) – установка под разрежением с пневматическим забрасывателем дробы; б) – установка под давлением с верхним забросом дробы; 1 – бункер для дробы; 2 – трубопровод для подачи дробы; 3 – дробеуловитель-циклон; 4 – эжектор; 5 – автоматический клапан-мигалка; 6 – тарельчатый питатель; 7 – разбрасыватель дробы; 8 – подвод охлаждающей воды; 9 – инжектор; 10 – выход продуктов сгорания; 11- выход воздуха из пылеуловителя

Расход дробы через систему  $G_{др}$ , кг/с, определяется по формуле:

$$G_{др} = g_{др} \cdot F_r / (n\tau),$$

где  $g_{др}$  - 100-200 кг/м<sup>2</sup> - удельный расход дробы на 1 м<sup>2</sup> сечения газохода;  $F_r$  - площадь сечения газохода шахты в плане, м<sup>2</sup>;  $n$  - количество пневмолиний (принимается, что одна пневмолиния обслуживает два разбрасывателя, каждый из которых обслуживает сечение по газоходу, равное 2,5 х 2,5 м;  $\tau$  - продолжительность периода очистки (обычно 20-60 с).

#### *6.8.7. Импульсная очистка*

Основана на ударном воздействии волны газов. Устройство для импульсной очистки представляет собой камеру, внутренняя полость которой сообщается с газоходами котла, в которых расположены конвективные поверхности нагрева. В камеру горения периодически подается смесь горючих газов с окислителем, которая воспламеняется искрой. При взрыве смеси проходящем от 0,001 до 0,01 с. В камере повышается давление и образующиеся волны газов очищают поверхности нагрева от загрязнений.



## Список литературы

1. Сагань И.И., Разладин Ю.С. Борьба с накипеобразованием в теплообменниках. Киев: Техника, 1986. 132 с.
2. Справочник химика-энергетика. Водоподготовка и водный режим парогенераторов / Ф.И. Белан, В.М. Герзон, С.М. Гурвич; под ред. С.М. Гурвича. М.: Энергия, 1972. 455 с.
3. Мещерский Н.А. Эксплуатация водоподготовительных установок электростанций высокого давления. М.;Л.: Энергия, 1965. 464 с.
4. Обработка воды на тепловых электростанциях / под общ. ред. В.А. Голубцова. М.;Л.: Энергия, 1966. 448 с.
5. Вихрев В.Ф., Шкроб М.С. Водоподготовка: учебник. М.: Энергия, 1973. 416 с.
6. Стырикович М. А., Резников М.И. Методы экспериментального изучения процессов генерации пара: учеб. пособие. М.: Энергия, 1977. 279 с.
7. Водоподготовка: Процессы и аппараты: учеб. пособие / А.С. Копылов, Н.П. Субботина, Л.А. Громогласов и др.; под ред. О.И. Мартыновой. М.: Атомиздат, 1977. 352 с.
8. Белан Ф.И. Водоподготовка: учебник. М.: Энергия, 1979. 208 с.
9. Мещерский Н.А. Эксплуатация водоподготовительных установок электростанций высокого давления. М.: Энергоатомиздат, 1984. 408 с.
10. Белоконова А.Ф. Водно-химические режимы тепловых электростанций. М.: Энергоатомиздат, 1985. 248 с.
11. Водоподготовительное оборудование и установки для ТЭС и промышленной энергетики: Отраслевой каталог 43-97 / сост. И.Г. Берсенева, В.А. Берсенов, Е.Б. Юрчевский и др. М.: ЦНИИТЭИтяжмаш, 1998. 92 с.
12. Белан Ф.И., Сутоцкий Г.Л. Водоподготовка промышленных котельных. М.: Энергия, 1969. 328 с.
13. Лифшиц О.В. Справочник по водоподготовке котельных установок. М.: Энергия, 1976. 287 с.

14. Водоподготовка и водный режим энергообъектов низкого и среднего давления: справочник / Ю.М. Кострикин, Н.А. Мещерский, О.В. Коровина. М.: Энергоатомиздат, 1990. 251 с.
15. Оликер И.И., Пермяков В.А. Термическая деаэрация воды на тепловых электростанциях. Л.: Энергия, 1971. 185 с.
16. Оликер И.И. Термическая деаэрация воды в отопительно-производственных котельных и тепловых сетях. Л.: Стройиздат, 1972. 137 с.
17. Труб И.А., Литвин О.П. Вакуумные деаэраторы. М.: Энергия, 1967. 99 с.
18. Тебенихин Е.Ф. Безреагентные методы обработки воды в энергоустановках. М.: Энергоатомиздат, 1985. 142 с.
19. Коптев А.П., Семенец Е.Г., Морозов А.П. Системы водоподготовки промышленных предприятий: Способы активации водных растворов. учеб. пособие. Магнитогорск: МГТУ, 2002. 76 с.
20. Маргулова Т.Х. Применение комплексонов в теплоэнергетике. М.: Энергоатомиздат, 1986. 275 с.
21. Химические очистки теплоэнергетического оборудования / под ред. Т.Х. Маргуловой. М.: Энергия, 1978. 175 с.
22. Гаврилов А.Ф., Малкин Б.М. Загрязнения и очистка поверхностей нагрева котельных установок. М.: Энергия, 1980. 328 с.