

В.Ф. Вихрев, М.С. Шкров

Водоподготовка

Учебник для вузов

**Москва
«Книга по Требованию»**

УДК 528
ББК 38.2
В11

В11 **В.Ф. Вихрев**
Водоподготовка: Учебник для вузов / В.Ф. Вихрев, М.С. Шкров – М.: Книга по Требованию, 2023. – 416 с.

ISBN 978-5-458-39048-4

ISBN 978-5-458-39048-4

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2023
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2023

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

ВВЕДЕНИЕ

0-1 ЗНАЧЕНИЕ ВОДОПОДГОТОВКИ И ВОДНОГО РЕЖИМА ТЕПЛОВЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИХ НАДЕЖНОЙ И ЭКОНОМИЧНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ

В ближайшем десятилетии главным направлением в развитии энергетики в СССР является преимущественно строительство крупных государственных районных электрических станций (ГРЭС), являющихся конденсационными электростанциями (КЭС), а также чисто отопительных и промышленных теплоэлектроцентралей (ТЭЦ), обеспечивающих комбинированное производство электроэнергии на базе теплового потребления коммунальных и промышленных предприятий городов и рабочих поселков. Отсюда следует, что тепловые электростанции (ТЭС) являются основной энергетической базой народного хозяйства СССР, водяной пар — основой энергетики, а вода — сырьем для получения пара и теплоносителем.

Перед советскими теплоэнергетиками поставлена задача дальнейшего повышения экономичности эксплуатации ТЭС, снижения численности эксплуатационного персонала и широкого внедрения механизации и автоматизации технологических процессов.

Характерной чертой развития отечественных районных КЭС является систематическое увеличение единичной мощности энергоблоков (парогенератор — турбина) и установленной мощности КЭС, а также повышение параметров пара.

Накопление эксплуатационного опыта и создание оригинальных конструкций крупных прямоточных парогенераторов и турбоагрегатов позволили широко развернуть в СССР строительство ГРЭС с блоками 150, 200, 300, 500 и 800 Мвт на давление пара у турбин 130 и 240 кгс/см².

В ближайшем будущем, очевидно, энергоблоки 500, 800 и 1200 Мвт на сверхкритическом давлении пара станут основным оборудованием тепловых паротурбинных электростанций. На крупных отопительных ТЭЦ устанавливаются теплофикационные турбоагрегаты мощностью 135 и 250 Мвт на параметры пара соответственно 130 кгс/см², 570°C и 240 кгс/см², 560/565°C. Ведущая роль паротурбинных электростанций в централизованном электро- и теплоснабжении страны, а также большие единичные мощности агрегатов предъявляют весьма высокие требования к обеспечению длительной, надежной и экономичной эксплуатации их с полной нагрузкой в целях бесперебойного снабжения потребителей электрической энергией и теплом.

Возможность длительной бесперебойной эксплуатации ТЭС в значительной степени определяется интенсивностью протекания физико-химических процессов накаливания на поверхности нагрева парогенераторов, уноса солей, кремниевой кислоты и окислов металлов паром из испаряемой (котловой) воды и образования отложений их в проточной части паровых турбин, а также коррозии металла энергетического оборудования и трубопроводов. Интенсивность протекания всех этих процессов зависит от качества пара, питательной и котловой воды.

Опыт многолетней эксплуатации мощных энергоблоков в СССР и за рубежом убедительно свидетельствует о том, что необходимым условием длительной, надежной и экономичной эксплуатации ТЭС является рациональная организация водоподготовки и водного режима парогенераторов и в первую очередь строгое соблюдение экспериментально обоснованных эксплуатационных норм качества пара, конденсата, питательной и котловой воды.

При решении водной проблемы паротурбинных электростанций существенное значение имеет то, что переход к сверхвысокому и сверхкритическому давлению значительно видоизменяет не только условия парообразования, но и свойства самого рабочего тела.

Одним из факторов, обуславливающих столь важное значение водной проблемы современных ТЭС, являются высокие удельные тепловые нагрузки стенок парообразующих труб парогенераторов. В целях обеспечения надежного температурного режима металла этих поверхностей и тем самым более продолжительной рабочей кампании парогенераторов необходимо жесткое ограничение

допустимой величины отложений на поверхностях нагрева, омываемых водой, пароводяной смесью или паром.

Другим важным фактором является повышенная чувствительность турбин высокого давления к загрязнению их проточной части. Даже небольшие отложения на лопатках турбины, еще не вызывающие снижения ее номинальной мощности, могут существенно снизить тепловую экономичность турбины и всего энергоблока. С повышением давления пара и переходом к прямоточным парогенераторам сверхкритического давления (с. к. д.) опасность загрязнения питательной воды резко возрастает из-за увеличения интенсивности коррозионных процессов с ростом температуры.

Основными задачами водоподготовки и рациональной организации водного режима парогенераторов и тракта питательной воды являются:

а) предотвращение образования на внутренних поверхностях парообразующих и пароперегревательных труб отложений кальциевых соединений и окислов железа, а в проточной части паровых турбин отложений соединений меди, железа, кремниевой кислоты и натрия;

б) защита от коррозии конструкционных металлов основного и вспомогательного оборудования ТЭС и теплофикационных систем в условиях их контакта с водой и паром, а также при нахождении их в резерве.

Для того чтобы блок парогенератор — турбина на ТЭС с. к. д. смог проработать в течение 4000—6000 ч без отложений в экранных трубах и в проточной части турбин, необходимо осуществлять весьма совершенные методы обработки добавочной питательной воды, а также очистки загрязненных конденсатов. Все эти мероприятия желательно проводить при минимальных капитальных затратах на сооружение водоподготовительных установок и с минимальными эксплуатационными расходами.

За прошедшие годы в нашей стране достигнуты значительные успехи в развитии средств водоподготовки и в повышении надежности и экономичности их эксплуатации. Существенный прогресс достигнут и в области организации рационального водного режима тепловых электростанций и химического контроля за водой и паром, а также в деле подбора коррозионностойких металлов и защитных покрытий.

Приступая к изучению курса «Водоподготовка», студент должен предварительно восстановить в памяти соот-

ветствующие разделы курса «Общая химия», в которых трактуются закономерности процессов электролитической диссоциации, гидролиза, выпадения труднорастворимых веществ и т. д. Особое внимание должно быть обращено на те соединения, которые являются обычными примесями природных вод (соли, газы, щелочи, органические примеси, силикаты и др.). Необходимо, кроме того, иметь достаточно четкое представление о трактующихся в курсе «Парогенераторы» внутрикотловых физических процессах теплообмена, гидродинамики, увлажнения генерируемого пара, а также знать применяемые в современных мощных парогенераторах схемы и конструкции устройств ступенчатого испарения, промывки пара и механической сепарации.

0-2. ОБРАЩЕНИЕ ВОДЫ В РАБОЧЕМ ЦИКЛЕ ТЕПЛОВОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Вода, получаемая из источников водоснабжения, используется на тепловых электростанциях: а) в качестве технологического сырья для получения пара в парогенераторах, испарителях и паропреобразователях; б) для конденсации отработавшего пара в конденсаторах паровых турбин и других производственных теплообменных аппаратах; в) для охлаждения продувочной воды и подшипников дымососов; г) для охлаждения воздуха, газов и масла в охлаждающих установках; д) в качестве рабочего теплоносителя в теплофикационных отопительных сетях и сетях горячего водоснабжения.

На рис. 0-1 изображены типичные принципиальные схемы обращения воды в рабочем цикле ТЭС с конденсационной турбиной (КЭС) и промышленной теплоэлектроцентрали с теплофикационной турбиной (ТЭЦ).

1. Исходная природная вода, получаемая из источников водоснабжения и направляемая в качестве технологического сырья на водоподготовительную установку либо используемая для каких-либо других целей в процессе получения электрической энергии.

2. Добавочная вода, используемая для восполнения потерь пара и конденсата в пароводяном цикле электростанции; в качестве добавочной воды к питательной воде парогенераторов могут быть использованы хи-

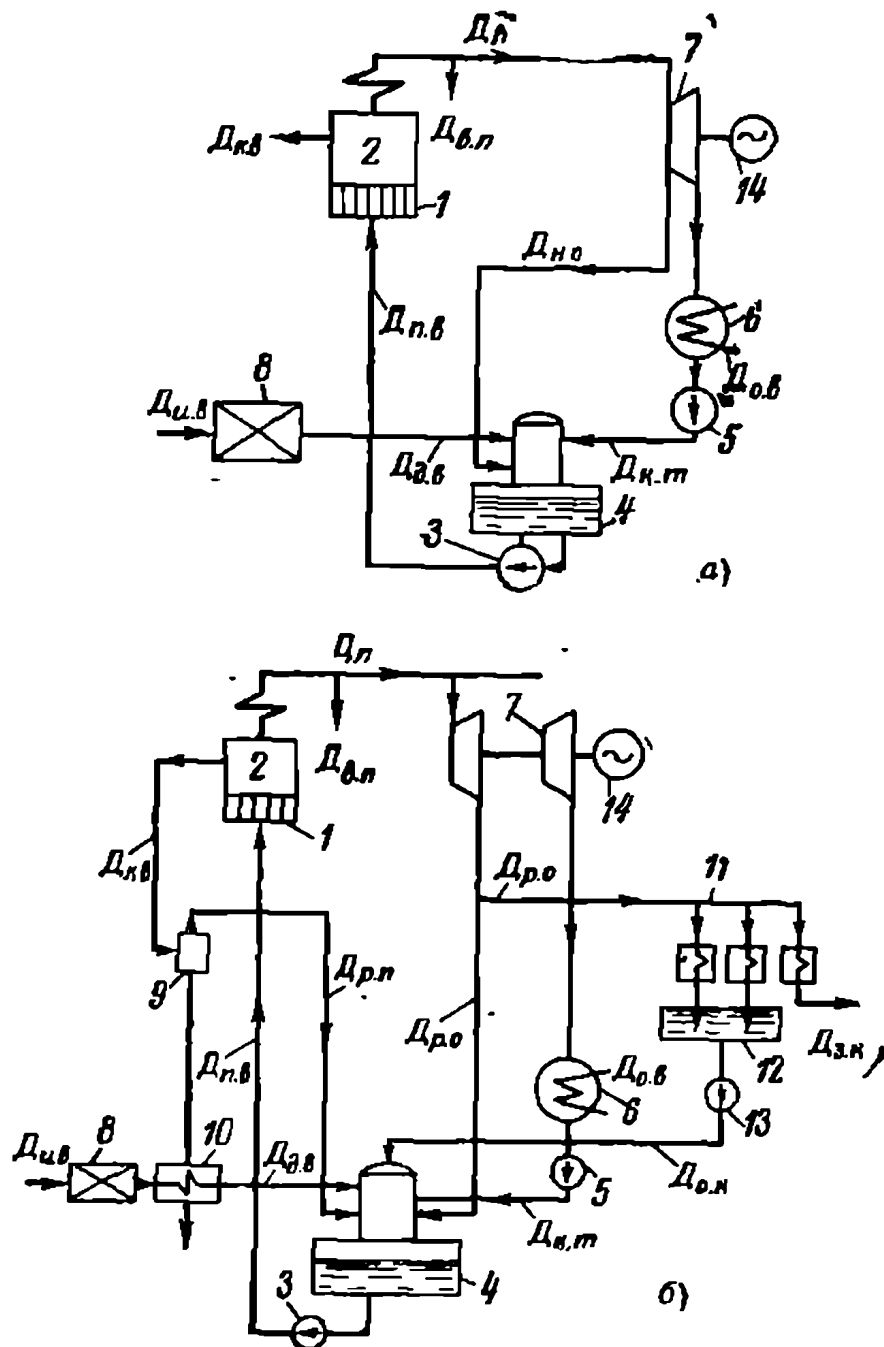


Рис. 0-1. Схемы обращения воды на КЭС и ТЭЦ.

а — электростанция с конденсационной турбиной (КЭС); *б* — теплоэлектроцентраль с теплофикационной турбиной (ТЭЦ); 1 — водяной экономайзер; 2 — парогенератор с пароперегревателем; 3 — питательный насос; 4 — деаэратор; 5 — конденсатный насос; 6 — конденсатор турбины; 7 — паровая турбина; 8 — водоподготовительная установка; 9 — расширитель непрерывной продувки; 10 — охладитель продувочной воды (подогреватель добавочной воды); 11 — внешние потребители пара; 12 — бак обратного конденсата; 13 — насос обратного конденсата; 14 — генератор; $D_{п}$ — пар из парогенератора; $D_{д.в}$ — пар из перегревателя; $D_{н.в}$ — пар из регулируемого отбора турбины; $D_{р.п}$ — пар из регулируемого отбора турбины; $D_{д.в}$ — добавочная вода; $D_{н.в}$ — исходная вода; $D_{п.в}$ — питательная вода; $D_{в.п}$ — внутростанционные потери пара и конденсата; $D_{к.т}$ — конденсат турбины; $D_{к.в}$ — котловая (продувочная) вода; $D_{о.в}$ — охлаждающая вода; $D_{р.п}$ — пар из расширителя продувочной воды; $D_{о.к}$ — обратный конденсат внешних потребителей пара; $D_{з.к}$ — загрязненный конденсат внешних потребителей пара.

мически обработанная вода или дистиллят (конденсат вторичного пара испарителей).

3. Конденсат турбин, содержащий незначительное количество растворенных веществ, является наиболее ценной составляющей питательной воды; поэтому следует всемерно стремиться к минимальным потерям его на ТЭС.

4. Обратный конденсат внешних потребителей пара используется, как составная часть питательной воды после его предварительной очистки от посторонних примесей.

5. Питательная вода, подаваемая насосами в парогенераторы для восполнения убыли испарившейся котловой воды и представляющая собой обычно смесь конденсата турбин, регенеративных и теплофикационных подогревателей, обратного конденсата внешних потребителей и добавочной воды.

6. Котловая вода, испаряемая в парогенераторах; воду, испаряемую в испарителях и паропреобразователях, называют концентратом.

7. Продувочная вода или концентрат, выпускаемые из парогенераторов, испарителей и паропреобразователей с целью поддержания в них на заданном уровне концентраций примесей, непрерывно поступающих в цикл ТЭС.

8. Охлаждающая или циркуляционная вода, используемая в конденсаторах паровых турбин для конденсации отработавшего пара.

9. Подпиточная вода, подаваемая в теплофикационную сеть для восполнения потерь циркулирующей в ней сетевой воды.

В рабочем цикле ТЭС имеют место внутриванционные потери пара и конденсата, основными источниками которых являются: а) парогенераторы, где теряется пар, расходуемый на привод вспомогательных механизмов, на обдувку наружных поверхностей нагрева от золы и шлака, на грануляцию шлаков в топке, на распыливание в форсунках жидкого топлива, при периодическом открытии предохранительных клапанов, при продувке пароперегревателей во время растопки парогенераторов и с непрерывной и периодической продувкой парогенераторов с многократной циркуляцией; б) турбоагрегаты, где имеют место непрерывные потери пара через лабиринтовые уплотнения и в воздуш-

ных насосах, отсасывающих из конденсаторов вместе с воздухом и некоторое количество пара; в) конденсатные и питательные баки, где происходит потеря воды через перелив и испарение горячего конденсата; г) питательные насосы, где происходит утечки воды через неплотности сальниковых уплотнений; д) трубопроводы, где происходят утечки воды через неплотности фланцевых соединений, запорной и регулирующей арматуры; е) термические деаэраторы, где происходит потеря пара с выпаром; ж) турбонасосы — с выхлопом пара; з) пробоотборочные точки — с конденсатом и водой.

Внутристанционные потери пара и конденсата могут быть значительно уменьшены путем установки дренажных и сливных баков для сбора конденсата, путем правильного выбора габаритов конденсатных баков, путем применения сварки трубопроводов и обеспечения высокой плотности фланцевых соединений, ликвидации парения предохранительных клапанов, отказа от использования паровых форсунок, паровых приводов и паровых обдувочных аппаратов, а также путем применения теплообменных аппаратов с приспособлениями для конденсирования и улавливания отработавшего пара. При соблюдении этих условий внутристанционные потери пара и воды составляют незначительную величину, не превышающую 0,5—1,0% общей производительности парогенератора. Следовательно, на КЭС основной составляющей питательной воды является конденсат турбин, что видно из водного баланса КЭС:

$$D_{п.в} = D_{к.т} + D_{д.в}, \quad (0-1)$$

где $D_{п.в}$ — часовой расход питательной воды, т/ч; $D_{к.т}$ — часовой расход конденсата турбин, т/ч; $D_{д.в}$ — часовой расход добавочной воды, т/ч, причем величина $D_{к.т}$ почти в 100 раз больше, чем $D_{д.в}$. Аналогичное положение имеет место и на чисто отопительных ТЭЦ.

Солеосодержание питательной воды $a_{п.в}$ на КЭС, определяемое из солевого баланса, равно:

$$a_{п.в} = \frac{D_{к.т}}{D_{п.в}} a_{к.т} + \frac{D_{д.в}}{D_{п.в}} a_{д.в}, \quad (0-2)$$

где $a_{к.т}$ и $a_{д.в}$ — солеосодержание соответственно конденсата турбин и добавочной воды, г/т, т. е. определяется в основном солеосодержанием конденсата турбин.

На промышленных ТЭЦ, отпускающих отработавший пар из отборов турбин внешним потребителям на различные производственные нужды, наряду с внутростанционными потерями пара и конденсата имеют место внешние потери, величина которых зависит от специфических особенностей технологии производства и конструкции заводских аппаратов, потребляющих пар.

Движение воды и пара на промышленной ТЭЦ осуществляется по двум замкнутым контурам (рис. 0-1,б): один — через конденсатор турбины, а второй — через производственные аппараты, использующие тепло отработавшего пара теплофикационных турбин. В схеме условно принято, что сбор и возврат высококачественного производственного конденсата осуществляются только двумя потребителями отборного пара, а у третьего потребителя конденсат загрязнен вредными для работы парогенераторов примесями. Загрязненный производственный конденсат подается на водоподготовительную установку для умягчения, обезмасливания и обезжелезивания. Иногда конденсат греющего пара настолько сильно бывает загрязнен вредными примесями в технологических аппаратах, что требуется сложная очистка его, которая может оказаться дороже обработки природной воды, и его приходится сбрасывать в канализацию. Поэтому при проектировании систем теплоснабжения промышленных предприятий решение вопроса о целесообразности возврата производственного конденсата на ТЭЦ в каждом отдельном случае должно быть обосновано соответствующими технико-экономическими расчетами.

Водный баланс промышленных ТЭЦ характеризуется следующим уравнением:

$$D_{\text{цв}} = D_{\text{кт}} + D_{\text{дв}} + D_{\text{ок}} + D_{\text{рп}}, \quad (0-3)$$

где $D_{\text{ок}}$ — обратный конденсат внешних потребителей пара, т/ч; $D_{\text{рп}}$ — пар из расширителя непрерывной продувки, т/ч.

На промышленных ТЭЦ добавочная вода восполняет не только внутростанционные потери пара и конденсата и потери воды с непрерывной продувкой, но и потери пара и конденсата у внешних потребителей. Поэтому относительная величина добавочной воды на промышленных ТЭЦ значительно больше, чем на КЭС, и конденсат турбин не является основной составляющей питательной воды.

Солесодержание питательной воды на промышленных ТЭЦ определяется не только солесодержанием конденсата турбин, но и солесодержанием других компонентов питательной воды, а именно:

$$a_{цв} = \frac{D_{кт}}{D_{цв}} a_{кт} + \frac{D_{гв}}{D_{цв}} a_{гв} + \frac{D_{ок}}{D_{цв}} a_{ок} + \frac{D_{рп}}{D_{цв}} a_{рп} \quad (0-4)$$

где $a_{ок}$ и $a_{рп}$ — солесодержание соответственно обратного конденсата и пара из расширителя непрерывной продувки, г/т.

В пароводяной тракт ТЭС непрерывно поступают загрязнения, ухудшающие качество питательной воды: а) с паром, вырабатываемым парогенератором; б) с присосами охлаждающей воды через неплотности в конденсаторах паровых турбин; в) с присосами через неплотности в теплофикационных подогревателях; г) с низкокачественным дистиллятом или с забросом концентрата во вторичный пар паропреобразователей; д) с загрязненным конденсатом внешних потребителей отборного пара теплофикационных турбин; е) с добавочной питательной водой, восполняющей потери пара и конденсата внутри ТЭС и у внешних потребителей пара; ж) с реагентами, вводимыми в тракт питательной воды для осуществления так называемого коррекционного водного режима, предназначенного для борьбы с коррозией конструкционных металлов и с накипеобразованием на поверхностях нагрева; з) с продуктами коррозии элементов энергетического оборудования и трубопроводов, омываемых водой или паром. При этом следует иметь в виду, что абсолютная величина каждого из перечисленных источников загрязнений может изменяться в довольно широких пределах в зависимости от типа ТЭС, условий ее эксплуатации, от принятой схемы обработки добавочной питательной воды и загрязненных конденсатов, а также от противокоррозионной стойкости применяемых конструкционных материалов и защитных покрытий. Для того чтобы предотвратить накопление поступающих в пароводяной тракт электростанции загрязнений, необходимо организовать их систематический вывод из пароводяного цикла путем непрерывной и периодической продувки парогенераторов с многократной циркуляцией, применения промыочно-сепарационных устройств проточных парогенераторов докритического давления, химического обессоливания конденсата и т. д.

Проверка плотности ряда конденсаторов показала, что величина присоса через неплотности и соединения колеблется в широких пределах, что обусловлено длительным воздействием на трубные пучки термических и динамических напряжений, возникающих под влиянием переменного теплового режима работы конденсатора. Кроме того, в случае агрессивной охлаждающей воды возникает опасность ее присосов через сквозные коррозионные свищи или трещины в стенках конденсаторных труб (см. гл. 2).

В тех случаях, когда охлаждающая пресная вода является маломинерализованной, загрязнения, поступающие с присосами в паровое пространство конденсатора, состоят в основном из кальциевых и магниевых солей. Если же охлаждающая вода обладает высокой минерализацией (солончатые и морские воды), то загрязнения состоят в основном из натриевых солей.

Количество солей, поступающих в конденсат турбин через неплотности, определяется величиной и длительностью присоса охлаждающей воды и ее солесодержанием. Величина присосов $\alpha_{0.в}$ охлаждающей воды может быть определена по показателям качества турбинного конденсата и охлаждающей воды из соотношения

$$\alpha_{к.т} = \alpha_n (1 - \alpha_{0.в}) + \alpha_{0.п} \alpha_{0.в}, \quad (0-5)$$

где $\alpha_{к.т}$, α_n и $\alpha_{0.в}$ — показатели качества (жесткость, солесодержание и др.) соответственно турбинного конденсата, пара и охлаждающей воды.

Учитывая малую величину α_n по сравнению с $\alpha_{0.в}$ формулу (0-5) можно упростить, тогда

$$\alpha_{0.в} = \frac{\alpha_{к.т} - \alpha_n}{\alpha_{0.п}} 100, \% \quad (0-6)$$

Отсюда следует, что на энергоблоках с к. д. в тех случаях, когда охлаждающая вода сильно минерализована, допустимый присос не должен превышать 0,002—0,005% расхода пара в конденсатор в условиях длительной эксплуатации энергоблока.

В целях герметизации вальцовочных соединений в трубных досках конденсаторов и предотвращения протечек охлаждающей воды через неплотности за последние годы широкое применение получили уплотняющие покрытия, наносимые на трубные доски. В качестве материалов для уплотняющих покрытий используются: а) битумная мастика; б) жидкий найрит (модификация