

*На правах рукописи*

**МЕРКУЛОВ Валерий Александрович**

**ИССЛЕДОВАНИЕ И РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ  
ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ  
КОНДЕНСАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ  
ТЕПЛОФИКАЦИОННЫХ ТУРБИН**

Специальность 05.14.14

Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Иваново  
2004

Работа выполнена в ОАО «Дзержинская ТЭЦ» и на кафедре Теплоэнергетические установки Московского государственного открытого университета

**Научный руководитель:**

кандидат технических наук, профессор **Е.М. Марченко**

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор **Б.М. Ларин**  
кандидат технических наук, доцент **Г.Г. Кузнецов**

**Ведущая организация:** ОАО «Инженерный центр» фирма «ОРГРЭС»

Защита состоится « 28 » июня 2004 года в 14<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при Ивановском государственном энергетическом университете по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д.34, аудитория Б-237.

Отзывы (в двух экземплярах, заверенные печатью) просим высылать по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д.34, ИГЭУ, Ученый совет.  
Факс:(0932)38-57-01.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2004 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета **Д212.064.01**  
доктор технических наук, профессор



**А.В. Мошкарин**

## Общая характеристика работы

**Актуальность работы.** Концепция РАО «ЕЭС России» по развитию и техническому перевооружению оборудования тепловых электростанций на период до 2020 года предусматривает наряду со строительством новых генерирующих объектов с применением передовых парогазовых технологий совершенствование оборудования и режимов работы действующего оборудования ТЭС

Основным резервом тепловой экономичности (ТЭ) на ТЭС является повышение эффективности работы конденсационных устройств, с наиболее полным использованием теплоты отработавшего пара для получения электрической энергии при ограниченных объемах охлаждающей воды. Это особенно важно в условиях привлечения теплофикационных агрегатов к регулированию электрической нагрузки при работе с частично или полностью открытой регулирующей диафрагмой.

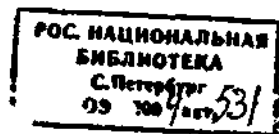
Поиск новых технических решений по повышению вакуума путем совершенствования способов очистки поверхностей теплообмена конденсаторов на основе изучения состава и структуры отложений, улучшения схем отсоса неконденсирующихся газов из парового пространства и воздуха из циркуляционной системы конденсаторов являются одними из важнейших задач персонала ТЭС, наладочных и проектных организаций. Отмеченные направления работ связаны с повышением эффективности работы эжекторов и системы регенеративного нагрева воды и как следствие, с повышением экономичности работы оборудования.

Все вышеизложенное подтверждает актуальность выбранной темы исследования в современных условиях состояния Российской теплоэнергетики.

**Цель работы.** Исследование и разработка технических решений по повышению тепловой эффективности и надежности конденсационных устройств теплофикационных турбин.

Для достижения указанной цели автором решались следующие задачи:

- анализ влияния различных факторов на экономичность и надежность работы конденсационных устройств теплофикационных агрегатов;
- разработка технических решений по повышению эффективности работы систем охлаждения конденсаторов на основе новых схем отвода воздуха и применения водоструйных эжекторов, их внедрение и натурная оценка на действующем оборудовании;
- расчетно-экспериментальное исследование эффективности применения охладителей паровоздушной смеси для основных пароструйных эжекторов турбин, внедрение, наладка и оценка экономичности и надежности их работы;
- разработка технических решений по снижению потерь теплоты с рециркуляцией основного конденсата в конденсаторах турбин, их внедрение и натурная оценка на действующем оборудовании;
- исследование состава и структуры отложений в трубках конденсаторов и разработка способов их очистки.



**Методы исследования.** Для решения задач в диссертационной работе использовались методы численных расчетов и натурные испытания на действующем оборудовании.

**Научная новизна работы:**

- выявлен механизм снижения эффективности теплообмена в конденсаторах действующих теплофикационных турбин;
- разработана технология повышения экономичности и надежности работы пароструйных эжекторов, основанная на предварительном охлаждении паровоздушной смеси потоком входящей циркуляционной воды;
- получены новые данные о физико-химическом составе и величине отложений внутри труб конденсаторов, позволяющие разработать рекомендации по способам их предотвращения и очистки;
- дана количественная оценка кинетики кислотной, композитной промывки конденсатора турбины и разработаны методы оперативного химического контроля водного режима конденсаторов, обеспечивающие повышение надежности конденсационных устройств.

**Достоверность и обоснованность полученных результатов** обеспечивалась использованием нормируемого парка приборов и известных методов проведения натуральных испытаний, совпадением расчетных и опытных характеристик кислотной промывки.

**Практическая ценность работы:**

- на основе выявленной неудовлетворительной работы пароструйных эжекторов циркуляционной системы, приводящей к завоздушиванию верхней части трубок конденсаторов, предложены мероприятия, повышающие надежность работы конденсационных устройств, включающие дополнительные места отсоса воздуха с выходных водяных камер и применение водоструйных эжекторов, исключающие гидроудары в трубопроводах при изменении режимов работы турбин путем сброса воды в сливной циркуляционный канал;
- предложена схема предварительного включения охладителя паровоздушной смеси, отсасываемой основными пароструйными эжекторами, обеспечивающая требуемую производительность и надежность их работы, более глубокий вакуум и получение дополнительной мощности в режимах с большими пропусками пара в конденсатор;
- предложена модернизация схемы рециркуляции основного конденсата для улучшения работы основных эжекторов и снижения потерь теплоты в конденсаторе турбины;
- испытаны способы промывки части трубок конденсаторов турбин обратным потоком воды на «ходу» (в режимах работы турбины), а также кислотными композициями (при останове), обеспечивающие эффективное удаление отложений;
- предложены способы автоматизированного контроля качества турбинного конденсата и охлаждающей воды, основанные на измерении электропроводности и кислорода

**Внедрение результатов работы.** Результаты научных и технических разработок автора внедрены на ОАО «Дзержинская ТЭЦ» в 2001-2002 гг.

**Личный вклад автора** определяется постановкой цели и задач исследования, проведением численных расчетов по обоснованию выбора вариантов технической модернизации конденсационных устройств, непосредственным участием в их реализации на ОАО «Дзержинская ТЭЦ», проведением натурных испытаний и обработкой их результатов, формулировкой выводов и рекомендаций.

**Автор защищает:**

- результаты анализа причин снижения эффективности работы конденсационных устройств теплофикационных агрегатов;
- способы повышения экономичности и надежности работы конденсационных устройств путем замены пароструйных эжекторов циркуляционной системы на водоструйные, обоснование выбора мест отсоса воздуха;
- расчетный выбор охладителя паровоздушной смеси, устанавливаемого перед основными пароструйными эжекторами, результаты натурных испытаний и экономической оценки и надежности схемы с предвключенными охладителями;
- схемы рециркуляции охлаждающей воды основных эжекторов теплофикационных турбин и результаты оценки их тепловой эффективности;
- технологию отмывки части трубок конденсаторов теплофикационных турбин «на ходу» обратным потоком воды и методику оценки кинетических характеристик кислотных промывок;
- результаты исследований по обработке охлаждающей воды фосфонатами и методику автоматизированного химконтроля охлаждающей воды и конденсата

**Апробация результатов работы.**

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на «IX МНТК «Радиоэлектроника, электротехника, энергетика» (Москва, 2003), МНТК «XI Бенардосовских чтениях» (Иваново, 2003), IV Российской НТК «Энегосбережение в городском хозяйстве, энергетике и промышленности» (Ульяновск, 2003), заседаниях кафедры Промышленная теплоэнергетика Московского государственного открытого университета (Москва, 2002), кафедр ТЭС и Химии и химических технологий в энергетике Ивановского государственного энергетического университета (Иваново, 2004), а также на технических совещаниях ОАО «Нижевоэнерго» и ОАО «Дзержинская ТЭЦ» (2000-2002 гг.).

**Публикации.** Основные положения диссертационной работы нашли отражение в 8 печатных работах, в том числе четырех статьях и четырех тезисах докладов научно-технических конференций.

**Объем работы.** Диссертация включает введение, пять глав, заключение, список использованной литературы и приложения.

Основной материал изложен на 180 страницах машинописного текста, включает 36 рисунков, 31 таблиц и 24 страниц приложений. Библиографический список содержит 174 наименований.

## Основное содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований, отражены научная новизна и практическая ценность полученных результатов, приведена структура работы.

В **первой главе** дан обзор публикаций по исследованиям ВТИ, ОРГРЭС и других организаций, связанным с изучением работы конденсационных устройств теплофикационных паровых турбин.

Эффективность работы конденсатора определяется поверхностной плотностью теплового потока при заданном давлении в трубном пучке. Лучшими считаются те конденсационные установки, у которых эта величина имеет наибольшее значение при том же давлении конденсации. Работа конденсатора зависит не только от параметров, определяющих процесс теплопередачи в трубном пучке, но и от условий взаимодействия процессов в пучке и элементах конденсационного устройства (КУ), степени взаимного влияния их на конечное давление, аэродинамического совершенства выхлопных патрубков ПТУ, обеспечивающих отвод пара от последней ступени в конденсатор, а также от характера течения пара в трубных пучках.

В процессе эксплуатации в конденсатор попадает воздух и другие неконденсирующиеся газы с паром и через неплотности вакуумной системы турбины. Это существенно ухудшает коэффициент теплоотдачи от конденсирующегося пара к стенке конденсаторных трубок, уменьшая общий коэффициент теплопередачи в конденсаторе, вследствие экранирования поверхности конденсации воздухом. При значительном проникновении воздуха в вакуумную часть турбины наблюдается переохлаждение конденсата, в особенности когда пароструйный эжектор начинает работать в перегрузочном режиме.

Для повышения эффективности работы конденсационных устройств необходима интенсификация в них процесса теплообмена, а также обеспечение высокой степени чистоты поверхности теплообмена.

К разработкам по повышению эффективности теплообмена относятся:

- применение профильных витых трубок, вертикальных продольно - профилированных трубок, трубок двойного профиля (повышение среднего коэффициента теплопередачи ( $K_{ср}$ ) 40-80 %);
- организация капельного режима конденсации пара (повышение  $K_{ср}$  40-60 %);
- применение компоновок «ленточных» и «модульных» трубных пучков.

К некоторому повышению экономичности приводит ступенчатая конденсация пара, при которой конденсатор делится на секции, последовательно вклю-

ценные по охлаждающей воде, но не связанные между собою по паровой стороне.

Перспективным является дальнейшее совершенствование комбинированных поверхностно - смешивающих КУ.

К числу основных методов повышения тепловой эффективности работы КУ относится повышение воздушной плотности и совершенствование схем взаимосвязи регенерации с конденсационным устройством. Для этого необходимо реализовать ряд практических мероприятий и провести исследования непосредственно в промышленных условиях. Для получения высокоэффективных КУ, способных иметь оптимальные значения термодинамических, эксергетических и технико-экономических показателей функционирования, необходимо использовать результаты научных исследований по системному анализу, математическому моделированию и оптимизации теплообменных процессов.

Интенсивность роста отложений на трубках конденсаторов зависит от ряда условий: типа конденсатора и охлаждающей системы, качества охлаждающей воды, методов ведения водно-химического режима. Поддержание нормативного  $K_{cr}$  при этом достигается как снижением интенсивности накипеобразования рациональной организацией водно-химического режима, так и своевременным и эффективным удалением образовавшихся отложений. Известные и новые реагентные методы, применяемые для этих целей, требуют изучения в реальных условиях эксплуатации КУ.

Для снижения потерь теплоты с пароводяными потоками, поступающими в конденсатор, в зависимости от условий эксплуатации турбин на ТЭЦ должны быть уменьшены вентиляционные пропуски пара в ЧНД, выполнена модернизация системы концевых уплотнений цилиндров для перехода на режим самоуплотнения, охлаждение основных эжекторов, сальникового подогревателя и других элементов схемы до линии рециркуляции переведено на охлаждение ХОВ и др.

Наряду с выше изложенным, высокая надежность КУ обеспечивается высокой плотностью конденсатора со стороны охлаждающей воды и основного конденсата. От этого зависит качество турбинного конденсата и питательной воды, подаваемой на котлы. Поскольку все мероприятия по повышению водяной плотности выполняются при отключении КУ (или его части), то основным фактором оценки состояния плотности КУ остается надежная организация химвконтроля качества турбинного конденсата.

**Во второй главе** изложены вопросы разработки технических решений по повышению экономичности и надежности работы КУ ТЭЦ на примере ОАО «Дзержинская ТЭЦ».

Для экономичной и надежной работы конденсатора все элементы схемы должны быть подобраны таким образом, чтобы их внешние характеристики стыковались между собой при различных режимах работы, а вспомогательные устройства работали эффективно и бесперебойно.

Одним из таких вспомогательных элементов является эжектор циркуляционной системы (ЭЦС), который предназначен для заполнения системы охлаждения конденсатора перед пуском и для удаления воздуха из верхних точек сливных циркуляционных водоводов (СЦВ) и других элементов схемы (маслоохладителей турбин и др.) в период эксплуатации. Неудовлетворительная работа ЭЦС или полное прекращение отсоса воздуха из проточной части циркуляционной системы приводит к завоздушиванию верхних трубок конденсатора, в результате чего конденсатор работает неполным трубным пучком. Наряду с экономическим ущербом, который возникает из-за неудовлетворительной работы ЭЦС, снижается надежность теплообменного оборудования, а, следовательно, безаварийная длительная эксплуатация всего турбоагрегата в целом.

На основе анализа работы ЭЦС и системы охлаждения конденсаторов турбин ОАО «Дзержинская ТЭЦ» установлено, что более эффективным для теплофикационных турбин является не пароструйный, а водоструйный эжектор. Установка водоструйных эжекторов (см. рис.1) с одновременным изменением точек отсоса воздуха из водяных камер позволила обеспечить постоянное удаление воздуха из проточной части системы охлаждения конденсаторов и обеспечила повышение степени заполнения верхних трубок.

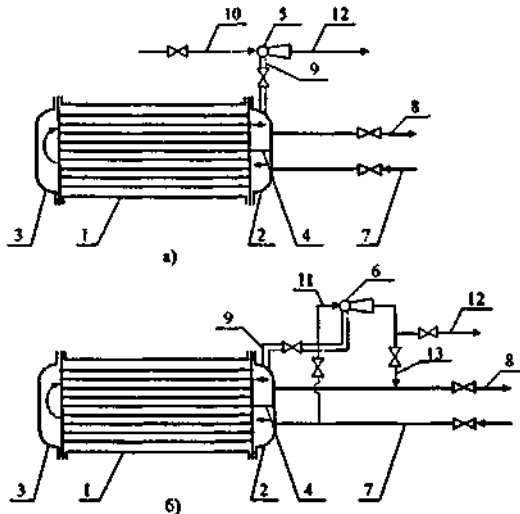


Рис. 1. Принципиальная схема подключения эжектора циркуляционной системы к конденсатору: а) - существовавшая ранее схема; б) - измененная схема; 1 - корпус конденсатора с трубной системой (вид сверху); 2, 3 - передняя и задняя водяные камеры; 4 - вертикальная раздельная перегородка (вид сверху); 5, 6 - паро- и водоструйный эжекторы; 7 - напорный циркуляционный водовод; 8 - сбросной циркуляционный водовод; 9 - трубопровод отсоса воздуха; 10 - подвод пара к эжектору; 11 - подвод воды к эжектору; 12 - сброс отработавшей среды и эжектируемого воздуха в ливневую канализацию; 13 - сброс отработавшей среды и эжектируемого воздуха в сливной циркуляционный водовод

В результате этого давление отработавшего пара в конденсаторах перечисленных турбин снизилось. Преимущество этой схемы заключается также в снижении потерь пара, необходимого для работы пароструйного эжектора и химических реагентов, затрачиваемых на подготовку добавочной воды для восстановления потерь пара.

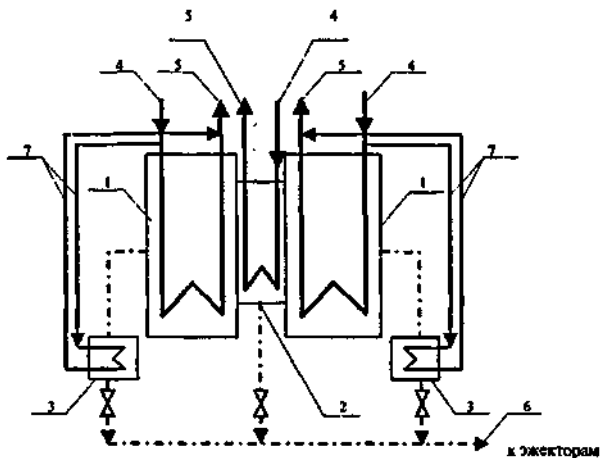
В работе дан алгоритм выбора водоструйных эжекторов для циркуляционной системы и выполнен расчет оценки повышения электрической мощности



от этих мероприятий для турбин ПТ-80/100-130/13, Т-100/120-130-3, ПТ-135/165-130/15. Расчеты показали, что для указанных турбин повышение мощности составит 1,65, 0,365, 0,403 МВт, соответственно. Результаты расчетов были подтверждены испытаниями.

Завершение конденсации пара и охлаждение удаляемой из конденсатора ПВС осуществляется в воздухоохладителе конденсатора. Пучок труб воздухоохладителя размещают в первом ходе охлаждающей воды. Это позволяет снизить температуру ПВС ( $t_{см}$ ), удаляемой из конденсатора. При увеличении  $\Sigma M$  повышается давления всасывания и соответственно давление отработавшего пара в конденсаторе.

Для повышения вакуума в конденсаторах турбин, перед воздухоудаляющим устройством на линиях отсоса ПВС из КУ целесообразным является установка предвключенных охладителей (ПО) ПВС. На (рис.2) показана принципиальная схема КУ КГ2-6200 турбоагрегата Т-100/120-130-3 с установкой ПО ПВС на линиях отсоса ПВС с наружных половин конденсатора.



**Рис. 2. Принципиальная схема установки ПО ПВС на линиях отсоса из конденсатора:**

1 – основные пучки конденсатора; 2 – встроенный пучок; 3 – предвключенный охладитель ПВС; 4 – подвод охлаждающей воды к основным и встроенному пучкам; 5 – отвод охлаждающей воды от основных и встроенному пучкам; 6 – отсос ПВС от основных и встроенного пучков; 7 – подвод и отвод охлаждающей воды от ПО

Поверочные расчеты показали, что для летних режимов работы, когда температура охлаждающей воды на входе выше  $15^{\circ}\text{C}$  эффективным является применение предвключенного охладителя паровоздушной смеси типа «труба в трубе». (Характеристика теплообменника: длина  $L = 2,41$  м внутренняя труба размером  $159,5 \times 4,5$  мм, наружная труба  $219 \times 6$  мм - применительно для одного ПО). ПО позволяет снизить температуру паровоздушной смеси на  $2^{\circ}\text{C}$  и уменьшить работу сжатия приблизительно на  $5$  кДж/кг. Установка ПО на турбине Т-100/120-130-3 ОАО «Дзержинская ТЭЦ» и последующие испытания подтвердили его эффективность. Годовая экономия электроэнергии, рассчитанная по форме № 3-тех (энерго), за 2002 год составила  $53$  тыс. кВт-ч.

В условиях эксплуатации КУ турбоагрегатов работа пароструйного эжектора протекает при переменных режимах: могут изменяться параметры пара перед рабочим соплом, количество и температура паровоздушной смеси, расход и температура охлаждающей воды. Повышение температуры основного конденсата, поступающего в промежуточный холодильник эжектора, приводит к снижению разности температур между конденсирующимся паром и основным конденсатом. Это является причиной увеличения расхода неконденсированного пара на входе во II ступень эжектора, в результате чего увеличивается давление всасывания II ступени. При этом давление в холодильнике повышается и наступает перегрузочный режим работы I ступени эжектора при меньшем, чем прежде, значении коэффициента эжекции.

I ступень переходит на допредельный режим работы, а давление всасывания ступени ( $p_{н(1ст)}$ ) начинает зависеть от  $t_{1к}$  на входе в промежуточный холодильник эжектора. Так, при расходе инжектируемого воздуха  $G_B = const$  и при изменении  $t_{1к}$  от 26 до 40 °C рабочий участок характеристики эжектора снижается на  $\Delta G_B = 15$  кг/ч (рис. 3)

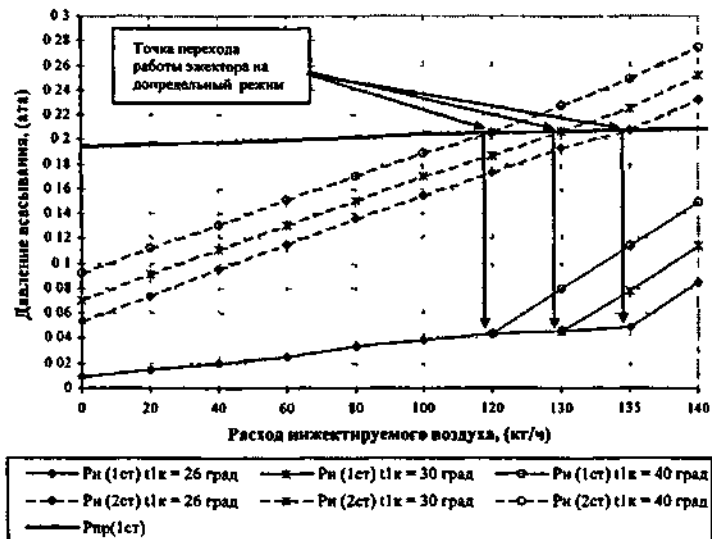


Рис 3 Влияние температуры воды, поступающей в промежуточный холодильник эжектора ЭП – 3 – 2А, на характеристику эжектора.

$p_{н(1ст)}$  ( $t_w = 11,5$  град,  $t_w = 25,5$  град,  $t_w = 32$  град) – давления всасывания I ступени,  $p_{н(2ст)}$  ( $t_w = 11,5$  град,  $t_w = 25,5$  град,  $t_w = 32$  град) – давления всасывания II ступени,  $p_{пр(1ст)}$  – предельное противодействие I ступени

Снижение тепловой экономичности паротурбинных установок связано со значительными потерями теплоты с пароводяными потоками, поступающими в конденсатор помимо проточной части низкого давления. К таким потокам от-

носятся рециркуляция основного конденсата ( $G_{ок}^{рсу}$ ), дренажи отборов и цилиндров турбины, отсос паровоздушной смеси и слив конденсата из подогревателей, уплотнений ЦНД и т.д. По данным заводов-изготовителей, расчётное значение расхода тепла с рециркуляцией основного конденсата ( $Q_{ок}^{рсу}$ ) для теплофикационных турбин мощностью 50\*200 МВт/ч составляет 1,75\*4,65 МВт (1,5-4 Гкал/ч).

В отопительный период (3600\*4000 ч/год) турбоагрегаты ТЭЦ работают по тепловому графику с минимальным пропуском пара в конденсатор, необходимым для отвода тепла трения ротора ЧНД. Из условия надежной работы турбоустановок, для охлаждения основных эжекторов, эжектора уплотнений и сальникового подогревателя, минимальный расход основного конденсата (для турбин ПТ-80/100-130/13, Т-100/120-130-3, ПТ-135/165-130/15) должен быть не менее 70 т/ч. Исходя из этого, рециркуляция основного конденсата в этот период эксплуатации должна быть включена.

Снизить потери теплоты с рециркуляцией основного конденсата ( $\Delta Q_3^{рсу}$ ) и повысить тепловую экономичность ПТУ можно, внедрив следующие мероприятия:

- выполнить перевод слива конденсата греющего пара всех ПНД в конденсатор, тем самым уменьшить  $G_{ок}^{рсу}$ , но это приведет к дополнительным потерям тепла в конденсационной установке (1,5-3,5 Гкал/ч). (Это мероприятие в работе не рассматривалось);
- подавать химобессоленную воду (ХОВ) в конденсатор турбоагрегата в количестве, необходимом для работы схемы регенерации низкого давления без рециркуляции основного конденсата;
- перевести охлаждение основных эжекторов, эжекторов уплотнений и сальникового подогревателя с основного конденсата на ХОВ.

В работе рассмотрено три варианта работы схемы конденсатного тракта низкого давления:

**1 вариант** - ранее применяемая схема конденсатного тракта низкого давления (Нагрев ХОВ происходит в атмосферном деаэраторе. Питание его осуществляется из линии греющего пара деаэраторов 0,6 МПа);

**2 вариант** - ХОВ подается в конденсатор турбоагрегата и нагревается в схеме конденсатного тракта низкого давления;

**3 вариант** - ХОВ подается на охлаждение основных эжекторов, эжекторов уплотнений и сальникового подогревателя, а основной конденсат после конденсатных насосов подается на группу ПНД.

При работе по 2 и 3 вариантам в сравнении с вариантом 1 в диапазоне ( $\Delta N_3^{рсу}$ ) наблюдается повышение электрической мощности турбоагрегата (рис.4). Это связано с тем, что пар из производственного отбора, подаваемый в линию греющего пара деаэраторов 6 ата (из линии греющего пара деаэраторов бата в деаэратор 1,2 на нагрев ХОВ), направлен во 2 варианте полностью, а в 3 варианте частично в ЦСНД турбины, а расход пара на группу ПНД во 2

варианте и группу ПНД и деаэратор 1,2 ата в 3 варианте меньше, чем суммарный расход пара в деаэратор 1,2 ата и ПНД в варианте I.

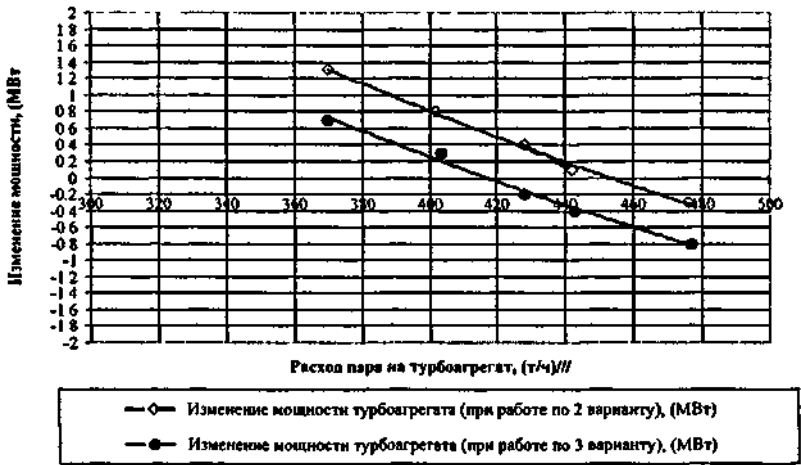


Рис. 4. Изменение электрической мощности на турбоагрегате ПТ-135/165-130/15 от расхода пара на турбину при работе схемы конденсатного тракта низкого давления по 2 и 3 вариантам :

При дальнейшем увеличении электрической нагрузки турбоагрегата происходит снижение мощности во 2 и 3 вариантах, так как увеличивается расход пара на группу ПНД. При работе по вариантам 2 и 3 из-за отсутствия  $G_{ок}^{pec}$  потерь теплоты с рециркуляцией нет. Указанные потери имеют место только при работе по 1 варианту.

Модернизация схемы рециркуляции основного конденсата на турбоагрегате ПТ-135/165-130/15 ОАО «Дзержинская ТЭЦ» (ст.№6), выполненная по варианту 3, позволила получить снижение тепловых потерь на 21000 ГДж (4826 Гкал) в год при длительности работы в указанных режимах 3800 часов.

В третьей главе представлены результаты промышленных исследований методов предотвращения образования отложений на теплопередающих трубках конденсаторов теплофикационных турбин.

На ОАО «Дзержинская ТЭЦ» проведено испытание модернизированной схемы промывки конденсатора (рис. 5) обратным потоком охлаждающей воды - наиболее распространенным методом предотвращения роста отложений для прямоточных систем охлаждения. Анализ сравнения показателей промывки по модернизированной и «старой» схеме, проведенной на конденсационном устройстве турбины ПТ-135/165-130/15 в конденсационном режиме, при паровых нагрузках конденсаторов 70, 55, 35 % от номинального значения, показал преимущества модернизации, состоящие в меньшем снижении мощности турбины на период промывки (рис. 6), в сокращении в 2,5 раза потребного числа промывок и сокращении времени одной промывки с 5-6 часов до 1,5 часов.

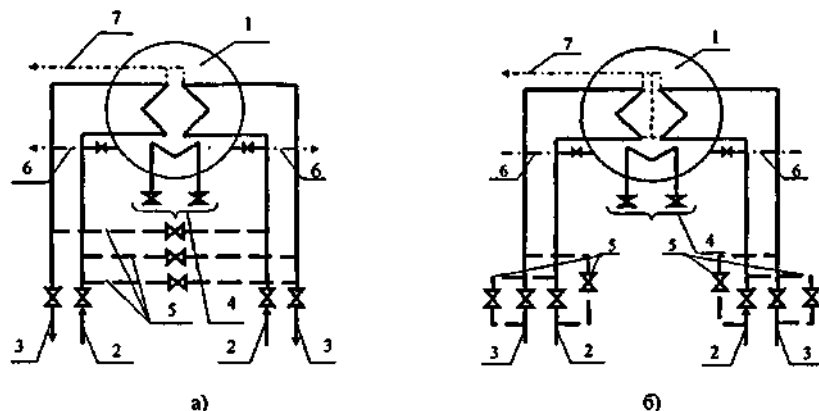


Рис. 5. "Старая" (а) и модернизированная (б) схемы промывки конденсатора: 1 – конденсатор; 2 – подвод охлаждающей воды к основным пучкам; 3 – отвод охлаждающей воды от основных пучков; 4 – подвод отвода охлаждающей воды от встроенного пучка; 5 – трубопроводы обратной промывки; 6 – отсос ПВС из конденсатора; 7 – отсос воздуха из ширксистемы

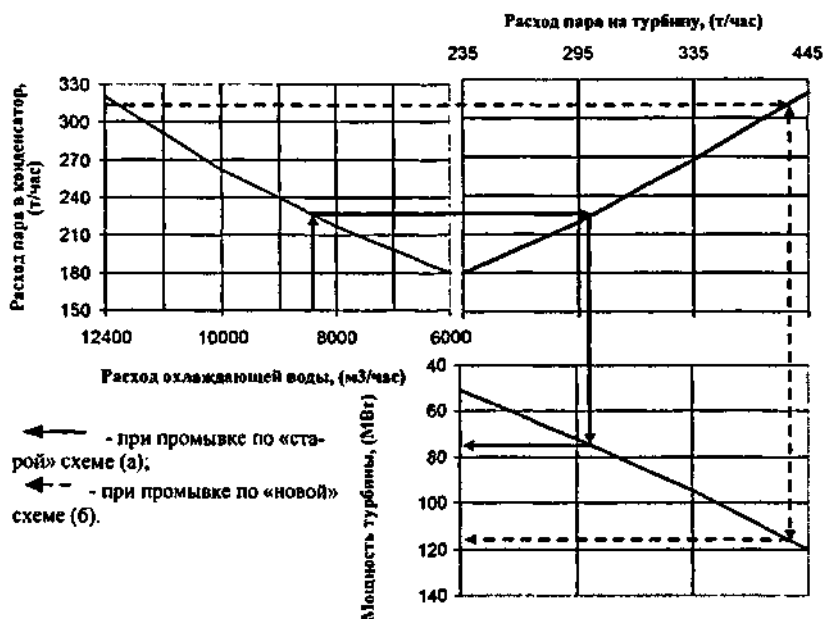


Рис. 6. Зависимость мощности турбины от расхода охлаждающей воды при  $r_2 \approx 0,064 \text{ кгс/см}^2$

Для оборотных систем охлаждения конденсаторов турбин одним из перспективных методов предотвращения отложений на трубках КУ является фосфонатная обработка охлаждающей воды. В рамках данной работы автором совместно с сотрудниками ИГЭУ проведены лабораторные исследования снижения накипеобразующего эффекта вводом фосфоната в охлаждающую воду, содержащую соединения железа и взвешенные вещества с проверкой на циркуле оборотной системы охлаждения ТЭЦ-ЭВС-2 ОАО «Северсталь» (рис. 7). Время защитного действия фосфонатов определяется как период, в течение которого отношение  $J_{\phi}/J_{\text{исх}}$  близко к единице.

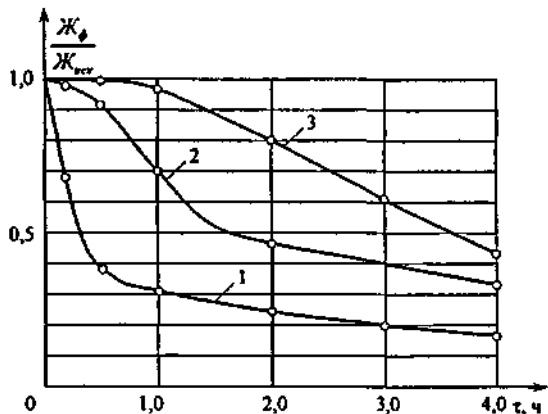


Рис 7 Зависимость от времени относительной жесткости циркуляционной ( $J_{\phi}$ ) и исходной ( $J_{\text{исх}}$ ) воды в условиях, моделирующих условия оборотной системы охлаждения КУ.

1 – модельный раствор без фосфонатов и железа, 2 – модельный раствор при дозировке фосфонатов ( $C_{\text{фос}}=1 \text{ мг/дм}^3$ ) и соединений железа ( $C_{\text{Fe}}=10 \text{ мг/дм}^3$ ), 3 – вода оборотной системы охлаждения ТЭЦ ЭВС-2 ОАО «Северсталь» с дозировкой фосфоната  $1 \text{ мг/дм}^3$  ( $C_{\text{Fe}}=1 \text{ мг/дм}^3$ )

Проведенные исследования показали, что рост концентраций соединений железа в охлаждающей воде увеличивает риск накипеобразования на трубках конденсатора, однако в условиях работы системы охлаждения, в частности, ТЭЦ-ЭВС-2 при содержании железа  $1-2 \text{ мг/дм}^3$  такой эффект невелик и может не приниматься во внимание. Защитные дозы фосфонатов составили  $0,5-2,0 \text{ мг/дм}^3$  в зависимости от жесткости и pH воды (с ростом pH доза НТФ увеличивается). Обработка дозированием фосфонатов может быть рекомендована для предотвращения отложений на трубках в оборотных системах охлаждения теплофикационных турбин.

В четвертой главе представлены результаты исследования кинетических и динамических характеристик кислотной промывки конденсатора КГ-2-6200-2 турбины Т-100/120-130-3. Снижение скорости низкотемпературного накипеобразования профилактическими приемами водно-химического режима не исключает периодических химпромывок конденсаторов турбин, которые в ряде случаев, являются практически единственным средством снятия отложений с трубок и приведения к нормативному значению коэффициента теплопередачи. Для типичного в таких случаях состава отложений (табл. 1), снятых с трубок конденсатора на Саранской ТЭЦ-2, наиболее приемлимым является промыв-

вочный раствор, содержащий ингибированную соляную кислоту (концентрацией 4-5 %) с добавкой водного конденсата низкомолекулярных кислот (ВК НМК:0,35 кг на 1 кг накипи). Такая композиция обеспечивает высокую скорость растворения накипи при низких скоростях коррозии основного металла (латуни или медно-никелевого сплава) и значительно снижает эффект пенообразования.

**Таблица 1. Химический состав отложений в трубках конденсаторов на Саранской ТЭЦ-2**

| Охлаждающая вода | Содержание, %           |      |     |     |                                |                  |     |                                |                   |
|------------------|-------------------------|------|-----|-----|--------------------------------|------------------|-----|--------------------------------|-------------------|
|                  | Потеря при прокаливании | CaO  | MgO | CuO | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | SiO <sub>2</sub> | ZnO | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Толщина отложений |
| речная р Инсар   | 32,3                    | 55,4 | 5,2 | 2,4 | 3,1                            | -                | -   | -                              | 2,5±3,0           |
|                  | Всего: 98,4             |      |     |     |                                |                  |     |                                |                   |

Исследование кинетики растворения накипи с образцов труб, протекающего согласно реакции:



показало преимущественно диффузионный характер процесса. Расчетные значения константы скорости реакции растворения отложений с поверхности образца представляются уравнением первого порядка в виде:

$$k \approx q/C \sim 10 \text{ см/с} \quad (2)$$

где  $q$  - масса растворенных отложений с единицы поверхности образца, г/см<sup>2</sup>;  $C$  - концентрация  $\text{HCl}$ , г/см<sup>3</sup>.

Убыль соляной кислоты в рабочем растворе ( $dm/dt$ ) можно представить интегральной зависимостью:

$$w = dm/dt = PFC, \text{ кг/мин}, \quad (3)$$

где  $P$  — коэффициент массопередачи, м/мин;  $F$  - площадь обрабатываемой поверхности, м;  $C$  - концентрация  $\text{HCl}$  в промывочном растворе, кг/м<sup>3</sup>.

Коэффициент массопередачи  $P$  в уравнении (3) характеризует скорость перемещения кислоты из объема раствора к обрабатываемой поверхности и является важной характеристикой для оценки времени окончания промывки в динамических условиях. Дело в том, что рекомендуемые скорости подачи рабочего раствора кислоты сильно различаются у разных авторов: от 0,05 м/с до 1,5 м/с. В рамках данной работы была получена расчетная зависимость коэффициента массопередачи от скорости прокачки промывочного раствора кислоты с добавкой ВКНМК. Для конденсатора КГ-2-6200 с внутренним диаметром трубок  $d=22$  мм с достаточной точностью можно представить такую зависимость в виде:

$$\beta = (0,3 + 6,25 \cdot W) \cdot 10^{-3}, \text{ м/мин} \quad (4)$$

где  $W$  - скорость промывочного раствора, м/с.

Для общего случая кислотных промывок конденсаторов (при  $t=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $d=20\text{ мм}$ , отсутствие пены) зависимость  $P - W$  в диапазоне возможных скоростей промывочного раствора показана на рис. 8.

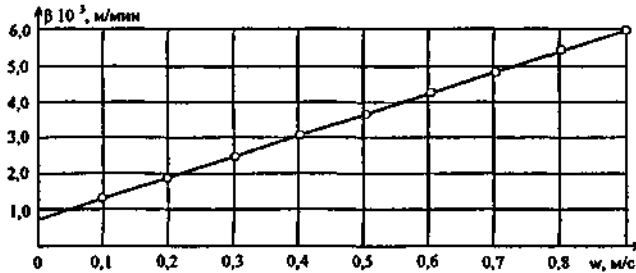


Рис. 8. Зависимость коэффициента теплопередачи от скорости промывочного раствора (при температуре раствора  $\sim 30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $d \approx 20 \cdot 10^{-3}$  м; и отсутствии пенообразования)

Тогда, при условии задания начальной массы кислоты по предполагаемой массе отложений, необходимое время промывки конденсатора (или его части) от карбонатных отложений можно оценить по уравнению:

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{30}{\beta} \cdot \frac{V}{F}, \text{ мин} \quad (5)$$

где  $V$  - объем промывочного раствора,  $\text{м}^3$ ;  $F$  - внутренняя поверхность трубок,  $\text{м}^2$ .

Например, если объем промывочного раствора равен  $40\text{ м}^3$ , поверхность вымываемых отложений -  $1200\text{ м}^2$ , а скорость прокачки раствора  $0,4\text{ м/с}$ , то предварительная оценка характеристики кислотной промывки трубок от карбонатных отложений дает:

$$\beta = (0,3 + 6,25 \cdot 0,4) \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 10^{-3}, \text{ м/мин};$$

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{30}{3 \cdot 10^{-3}} \cdot \frac{40}{1,2 \cdot 10^{-3}} = 35 \text{ мин.}$$

Полученные выражения  $P$  и  $\tau, \text{ пр}$  могут использоваться для оценки характеристик кислотных промывок различных конденсаторов турбин (а также другого теплообменного оборудования) на стадии предварительной проработки технологии процесса.

Практическая проверка расчетных зависимостей кинетики и динамики кислотной промывки выполнена на конденсаторе КГ-2-6200-2 паровой турбины Т-110/120-130-3 Саранской ТЭЦ-2 при проведении персоналом ТЭЦ очередной химпромывки. В табл. 2 даны результаты промывки четверти конденсатора.

Результаты обрабатывались в виде зависимости скорости срабатывания раствора кислоты ( $\omega$ , кг/мин) от времени промывки и представлены на рис. 9.



Таблица 2. Результаты промывки кислотной композицией HCl+ВКНМК ¼ трубок конденсатора КГ-2-6200-2 турбины Т-100/110-130 на Саранской ТЭЦ-2

| № п/п | $t$ , мин | Концентрация раствора HCl |                                | Кол-во оставшейся кислоты в момент времени $t$ , в пересчете на 100% продукт, кг | Кол-во сработанной кислоты к моменту времени $t$ , в пересчете на 100% продукт, кг | Скорость срабатывания раствора (HCl) $W$ , кг/мин |
|-------|-----------|---------------------------|--------------------------------|--|--|---|
|       |           | $C$ , %                   | $C$ , г/л (кг/м <sup>3</sup> ) |  |  |   |
| 1     | 0         | ~7,00                     | ~70,0                          | ~2800  | 0  | ~ 218   |
| 2     | 5         | 4,27                      | 42,7                           | 1710   | 1090   | ~ 71  |
| 3     | 13        | 2,74                      | 27,4                           | 1100   | 1700   | ~ 34  |
| 4     | 23        | 1,90                      | 19,00                          | 760  | 2040   | ~ 8   |
| 5     | 48        | 1,4                       | 14,0                           | 560  | 2240   | ~ 8   |
| 6     | 58        | 1,2                       | 12,0                           | 480  | 2320   | ~ 8   |
| 7     | 68        | 1,0                       | 10,0                           | 400  | 2400   |   |

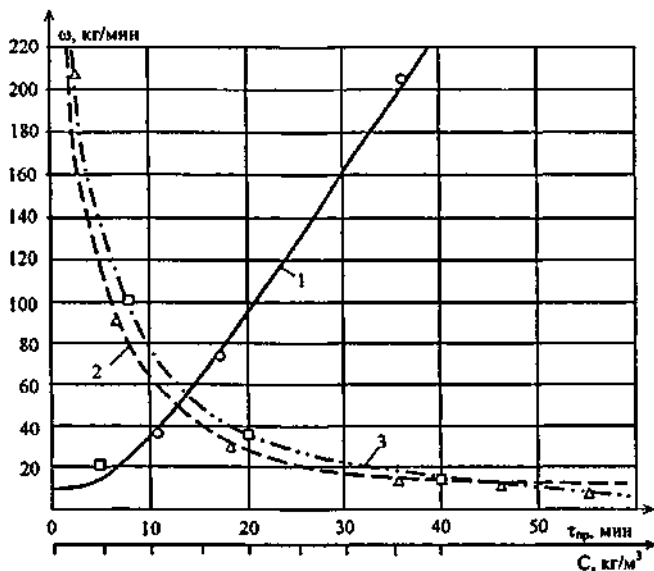


Рис. 9. Зависимость скорости срабатывания HCl от концентрации раствора (1) по табл. 2, и времени контакта с трубками конденсатора; 2 – фактическая, по табл. 2; 3 – расчетная, по уравнениям (3)-(5) при постоянной концентрации

При этом принимались фактические величины (параметры процесса):  $V=40 \text{ м}^3$ ;  $F=1200 \text{ м}^2$ ;  $P=3 \cdot 10^{10} \text{ м/мин}$ ; начальная масса кислоты  $m_0=2800 \text{ кг}$ . Как видно из рис. 9 расчетная кривая адекватно отражает реальный процесс, при

фактической скорости промывки -  $0,30\text{--}0,45$  м/с; и коэффициенте массопередачи  $\beta_{\text{факт}} = 3 \cdot 10^{-3}$  м/мин.

Таким образом, скорость промывочного раствора при проведении кислотных промывок конденсаторов турбины от карбонатных отложений определяется выбором значения коэффициента массопередачи ( $\beta$ ) и фактическим количеством отложений на трубах. В процессе исследований разработан ряд практических мер по совершенствованию кислотных промывок конденсаторов, в частности, было установлено, что при больших отложениях на трубках ( $b_{\text{отл}} > 1$  мм) скорость промывочного раствора в первые 5 минут после включения циркуляционного насоса не должна превышать  $0,1$  м/с по условиям предотвращения гидроударов в промывочной системе.

В пятой главе представлены результаты исследования и разработки методов оперативного химического контроля за присосами воды и воздуха в конденсаторах. В работе дан анализ качества турбинного конденсата по результатам обследования на ряде ТЭС, в т.ч. ОАО «Дзержинская ТЭЦ», Саранской ТЭЦ-2, ТЭЦ-17 ОАО «Мосэнерго» и др.

Показано значительное превышение нормативных значений в конденсате по содержанию кислорода и периодическое увеличение электропроводности, что свидетельствует о наличии присосов воздуха и охлаждающей воды.

Дана оценка методов контроля присосов охлаждающей воды, на основании чего рекомендовано использование измерения удельной электропроводности в качестве основного метода контроля качества турбинного конденсата (рис. 10).

Кроме этого в работе приведен анализ методов автоматизированного химического контроля качества охлаждающих и технологических вод на основе измерения электропроводности и присосов воздуха по измерению кислорода.

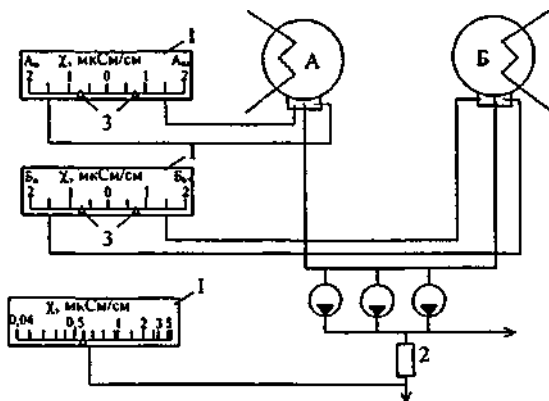


Рис. 10. Схема кондуктометрического контроля конденсата турбин при отключении конденсатора по четвертям:

1 – сигнализатор присосов; 2 – кондуктометр с И-колонкой, 3 – установки сигнализации

## Выводы

1. Выполнен и реализован на практике комплекс работ, содержащий совокупность научных, методических, технических положений по разработке мероприятий, повышающих тепловую эффективность и надежность работы конденсационных устройств теплофикационных турбин.

2. На основе анализа работы ТЭЦ и технической литературы выявлены основные причины низкой эффективности работы конденсационных устройств, к главным из которых следует отнести низкий вакуум в конденсаторе, потери теплоты потоков, сбрасываемых в конденсатор, загрязнение поверхностей теплообмена.

3. Для ОАО «Дзержинская ТЭЦ» разработан ряд технических решений, обеспечивших повышение вакуума в конденсаторах паровых турбин.

Для ликвидации скоплений растворенного воздуха, выделяющегося при нагреве циркуляционной воды и заполняющего верхние участки трубок конденсатора, предложены и внедрены в эксплуатацию:

а) дополнительные точки отсоса из верхней части выходных водяных камер конденсатора;

б) водоструйный эжектор, необходимой производительности, постоянно работающий во всех режимах эксплуатации турбины и снижающий энергетические потери, по сравнению с пароструйным эжектором, предусмотренным проектом для циркуляционной системы.

4. Для повышения эффективности работы основных эжекторов предложен и реализован на практике ПО ПВС типа «труба в трубе», обеспечивающий снижение температуры паровоздушной смеси на 2 °С для снижения  $p_n(1ст)$ , и соответственно повышения вакуума в конденсаторе и приводящий к уменьшению работы сжатия в основных эжекторах примерно на 5 кДж/кг. Составлен алгоритм поверочного расчета предвключенного охладителя, на основе которого выполнена его конструктивная разработка. Испытания подтвердили эффективность использования предвключенного охладителя в режимах работы с большими пропусками пара в конденсатор.

5. Предложена схема модернизации рециркуляции основного конденсата, позволяющая минимизировать зависимость работы основных эжекторов от температуры основного конденсата, что в свою очередь приводит к углублению вакуума в конденсаторе ПТУ (в летний период работы турбоустановок), позволяет исключить потери тепла с рециркуляцией основного конденсата (при работе турбоагрегатов по тепловому графику нагрузок и в диапазоне  $\Delta N_{\text{рел}}$ ).

Расчитан годовой эффект от внедрения схемы на турбине ПТ-135-130/15 Показано, что годовая экономия теплоты составляет 21000 ГДж (4826 Гкал).

6. Проведены промышленные исследования и внедрена на ОАО «Дзержинская ТЭЦ» новая схема водной промывки конденсатора, позволяющая сократить в 2,5 раза потребное число промывок, сократить общее время одной про-

мывки с 5--6 часов до 1,5 часов при небольшом снижении мощности турбины на период промывки.

7. Получены новые данные по обработке охлаждающей воды фосфонатами и рекомендованы дозировки НТФ при обработке воды оборотных систем охлаждения.

8. Проведены исследования и получены расчетные зависимости кинетики кислотной промывки трубок конденсаторов от карбонатных отложений, позволяющие производить выбор скорости пропуска промывочного раствора и оценивать требуемое время химпромывки.

9. Проведен анализ данных по качеству конденсата теплофикационных турбин ряда ТЭС и предложены схемы автоматизированного химконтроля присосов воздуха и охлаждающей воды.

#### **Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:**

1. **Меркулов В.А.** Удаление неконденсирующихся газов из конденсаторов турбин // Энергосбережение и водоподготовка. 2001. №1. С.54<sup>^</sup>-57.

2. **Меркулов В.А.** Влияние эжектора циркуляционной системы на экономичность и надежную работу конденсационных устройств паровых турбин // Энергосбережение и водоподготовка. 2001. №2. С 35-5-38.

3. **Меркулов В.А.** Повышение эффективности эксплуатации конденсационных устройств паровых турбин // Энергосбережение и водоподготовка. 2002. №2. С. 43-46

4. **Меркулов В.А., Марченко Е.М.** Влияние работы конденсационных устройств на эффективность турбоустановок в зависимости от загрузки электростанции // Тез. докладов IX МНТК «Радиоэлектроника, электротехника, энергетика», Москва, 2003. Том 3. С. 148-5-149.

5. **Меркулов В.А., Марченко Е.М.** Изменение системы охлаждения основных эжекторов турбины // Там же. С. 147.

6. **Меркулов В.А., Виноградов В.Н., Бушуев Е.Н.** Новые методы автоматического контроля качества турбинного конденсата // Тез. докладов XI Бенардосовские чтения. Иваново. 2003. Том 1. С. 198.

7. **Меркулов В.А., Бушуев Е.Н.** Энергосберегающие режимы эксплуатации конденсационных установок ТЭС // Материалы IV РНТК Энергосбережение в городском хозяйстве, энергетике, промышленности. Ульяновск. 2003. Том 2. С.47.

8. **Чебанов С.Н., Меркулов В.А.** Совершенствование технологических характеристик кислотной промывки конденсационной установки // Вестник ИГЭУ, 2004, №2. С.28+30.



Формат 60x84 1/16  
Печать плоская

Тираж 80 экз.  
Заказ 0428

Отпечатано в ОМТ МИБИФ  
153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34, оф.101, тел. (0932) 38-37-36



#13263