

---

*На правах рукописи*

АВАН Васим Кайсир

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА  
ТЭЦ СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ**

Специальность: 05.14.14 – Тепловые электрические станции,  
их энергетические системы и агрегаты

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Иваново  
2011

Работа выполнена на кафедре «Химия и химические технологии в энергетике» Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент

**Виноградов Владимир  
Николаевич**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор

**Шувалов Сергей Ильич**

кандидат технических наук, доцент

**Масленников Владимир  
Владимирович**

Ведущая организация:

**Открытое акционерное общество «Зарубежэнергопроект»**

Защита состоится « 27 » мая 2011 года в 11<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при Ивановском государственном энергетическом университете по адресу: 153003, Иваново, Рабфаковская, 34, корпус «Б», аудитория 237.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью организации, просим присылать по адресу: 153003, Иваново, Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, факс: (4932) 38-57-01. E-mail: uch\_sovet@ispu.ru.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета. Автореферат размещен на сайте ИГЭУ [www.ispu.ru](http://www.ispu.ru)

Автореферат разослан « 27 » апреля 2011 г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.064.01  
доктор технических наук, профессор



А.В. Мошкарин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Надёжность, экономичность и безопасность теплоэнергетического оборудования и трубопроводов ТЭЦ и подключенных к ним конденсатных и тепловых сетей зависят от состояния водоподготовительных установок (ВПУ) и других систем ведения их водно-химического режима (ВХР).

Требования к водно-химическому режиму регламентируются Правилами технической эксплуатации электрических станций и сетей (2003 г.) и более поздними нормативными документами. Возрастает влияние заводов-изготовителей основного теплоэнергетического оборудования, устанавливающих повышенные требования к теплоносителю (рабочему телу), при соблюдении которых сохраняются гарантийные обязательства этих заводов. Наблюдается ужесточение требований к системам ведения водно-химического режима. В первую очередь, это ужесточение относится к парогазовым ТЭС.

В то же время отмечена тенденция ухудшения качества исходных вод, обусловленного техногенными причинами (увеличением количества используемых и сбрасываемых в поверхностные водоёмы веществ) и климатическими воздействиями, вторичным использованием производственных вод ТЭС, например, бактериально загрязнённых вод систем оборотного охлаждения, предочищенных вод промышленно-ливневой канализации. В этих условиях возможно развитие негативных процессов, неучтённых ранее при проектировании ТЭС. К ним относятся микробиологические процессы и коррозия под воздействием продуктов их жизнедеятельности, коррозия из-за недостаточно эффективной защиты от аэрации конденсатов и воды.

Микробиологические процессы способствуют ухудшению показателей качества вод, загрязнению и повреждению ионообменных материалов, ухудшая технологические показатели и уменьшая срок их службы. Продукты жизнедеятельности железобактерий увеличивают гидравлическое сопротивление трубопроводов, нитрифицирующих бактерий - могут вызвать повреждение экранных труб котлов.

Внутренняя коррозия теплоэнергетического оборудования и трубопроводов ещё не может считаться устранённой проблемой. Для борьбы с этой коррозией и микробиологическими процессами, с учётом значительности ущерба от них, актуальны дополнительные исследования и совершенствование водно-химического режима, увеличение диагностических возможностей существующих систем химического контроля.

**Соответствие диссертации паспорту специальности.** Диссертация соответствует паспорту специальности 05.14.14 – «Тепловые электрические станции, их энергетические системы и агрегаты»:

**в части формулы специальности** – «... разрабатываются вопросы водоиспользования и водных режимов, ... решаются проблемы обеспечения ... рабочего ресурса оборудования тепловой электростанции, её систем ...»;

**в части области исследования** – п. 2: «Исследование ... процессов, протекающих в агрегатах, системах и общем цикле тепловых электростанций»; п. 3: «Разработка, исследование, совершенствование действующих и освоение новых технологий ... водно-химических режимов ...».

**Целью работы** является совершенствование водно-химического режима ТЭЦ среднего давления, использующих умягчённую добавочную воду, посредством предотвращения бактериальных процессов на ВПУ и внутренней коррозии трубопроводов при увеличении диагностических возможностей существующих систем химико-технологического контроля. Для достижения поставленной цели в работе сформулированы следующие **задачи**:

1. Исследовать зависимость биохимического потребления кислорода от технологических факторов на опытном стенде и на водоподготовительных установках. Проверить возможность использования кислородометрии для оценки интенсивности микробиологических процессов в оборудовании водоподготовки и эффективности защитных мер.

2. Исследовать массообмен при внутренней коррозии трубопровода кислого конденсата и установить зависимости его технологических характеристик от режимных факторов, обосновать мероприятия по защите этого трубопровода от внутренней коррозии.

3. Проверить применимость аналогичных зависимостей для описания массообмена при внутренней коррозии начального участка напорного трубопровода тепловых сетей.

4. Определить условия эффективного применения центробежных вихревых деаэраторов перегретой воды для защиты от эксплуатационной внутренней коррозии трубопроводов конденсата и тепловых сетей.

**Научная новизна работы** состоит в следующем:

1. Установлены зависимости от технологических факторов потребления кислорода, обусловленного бактериальными процессами в механических и катионитных фильтрах ВПУ.

2. Определён относительный вклад катодных реакций с участием кислорода и выделением водорода в воду при внутренней эксплуатационной коррозии трубопроводов конденсата и тепловых сетей. Полу-

чены экспериментальные данные о коррозии углеродистой стали в кислом конденсате.

3. Установлены зависимости технологических характеристик массообмена от режимных факторов при внутренней коррозии трубопровода кислого конденсата, позволяющие определить их вклад в загрязнение конденсата и трубопровода конденсата.

#### **Практическая значимость работы.**

1) С применением кислородометрии для оценки интенсивности микробиологических процессов в оборудовании водоподготовки проверена эффективность защитных мер и выбраны условия антибактериальной обработки воды на водоподготовительных установках ряда объектов энергетики;

2) Разработаны и переданы для реализации рекомендации по увеличению диагностических возможностей системы контроля внутренней коррозии трубопроводов конденсата и тепловых сетей с использованием кислородометрии и по уменьшению концентрации продуктов коррозии в возвратном конденсате;

3) Определены требования к содержанию кислорода в возвратном конденсате и условия технологически эффективного применения центробежных вихревых деаэраторов перегретой воды для его деаэрации.

**Реализация результатов работы.** Результаты работы внедрены ЗАО «Ивэнергосервис» в ТЭС ЧерМК ОАО «Северсталь» при разработке регламента по защите катионитов от бактериального заражения, на Ивановской ТЭЦ-1 и парогазовой ТЭЦ ЗАО «РЭК» при разработке мер по уменьшению загрязнения возвратных конденсатов продуктами коррозии, МП «Ивгортеплоэнерго» при контроле внутренней коррозии трубопроводов тепловых сетей.

**Достоверность и обоснованность результатов работы** обеспечивается использованием поверенных приборов и стандартизованных методов измерений, большим объемом опытных данных лабораторных, стендовых и промышленных испытаний; сходимостью результатов теоретических и экспериментальных исследований, совпадением отдельных результатов с данными других авторов.

#### **Автор защищает:**

1. Зависимости потребления кислорода в механических и Na-катионитных фильтрах водоподготовительных установок, обусловленного бактериальными процессами, и рекомендации по оперативному обнаружению микробиологических процессов в ионитных водоподготовительных установках и оценке технологической эффективности защитных мероприятий для этих установок.

2. Результаты определения относительного вклада катодных реакций с участием кислорода и выделением водорода в воду при внутренней эксплуатационной коррозии трубопроводов конденсата и тепловых сетей.

3. Зависимости (технологические характеристики) массообмена при внутренней коррозии трубопровода кислого конденсата и требования к содержанию кислорода в возвратном конденсате ТЭЦ среднего давления, условия технологически эффективного применения центробежных деаэраторов перегретой воды для его деаэрации.

**Личный вклад автора** заключается:

– в участии в экспериментальном получении данных о биохимическом потреблении кислорода на опытном стенде и на водоподготовительных установках; об относительном потреблении кислорода и выделении водорода в воду при внутренней эксплуатационной коррозии трубопроводов конденсата и тепловых сетей; о скорости коррозии стали 20 в кислых конденсате и сетевой воде в зависимости от массовой концентрации кислорода;

– получении зависимостей технологических характеристик массообмена при внутренней коррозии трубопровода конденсата;

– участии в определении условий технологически эффективного применения центробежных деаэраторов перегретой воды для деаэрации конденсата, подлежащего возврату на ТЭЦ.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы представлялись на следующих конференциях: Межрегиональная научно-практическая конференция «Моделирование энергоресурсосберегающих технологий» (г. Волжский, 2009), XVI научно-техническая конференция студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» МЭИ (г. Москва, 2010), конференции молодых ученых Центрального федерального округа «Актуальные направления научных исследований» (г. Калуга, 2009), V международная и научная конференция «Тинчуринские чтения» (г. Казань, 2010), V Региональная научно-техническая конференция «Теплоэнергетика» (г. Иваново, 2010) и V юбилейная всероссийская научно-практическая конференция (г. Иваново, 2010).

**Публикации.** Основное содержание работы отражено в 10 публикациях, в том числе, в 5 научных статьях, 5 тезисов докладов.

**Содержание и объем работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, характеристики основных результатов работы и списка литературы, включающего 127 наименований и приложений. Работа изложена на 140 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, определены её цель и задачи, указана научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе** приведён обзор состояния проблемы нарушений режимов ионитных ВПУ и ВХР вследствие микробиологических процессов и нарушений ВХР вспомогательных систем ТЭС (систем возвратного конденсата и подключенных тепловых сетей), приводящих к усилению внутренней эксплуатационной коррозии теплоэнергетического оборудования и трубопроводов; диагностики этих нарушений.

Ведущая роль в России в развитии технологии и диагностических методов для ВПУ и ведения водно-химических режимов ТЭС принадлежит ВТИ (Акользин П. А., Кострикин Ю. М., Живилова Л. М., Коровин В.А. и др.) и МЭИ (О. И. Мартынова, Н. П. Субботина). На базе этих методов разработаны системы автоматизированного контроля водоподготовительных установок, химико-технологического мониторинга ВХР, вводятся в работу автоматизированные ВПУ и системы автоматизированного ведения ВХР (Воронов В.Н., Петрова Т.И., Назаренко П.Н., Сметанин Д.С.). Существенный вклад в развитие методов косвенного контроля, основанных на положениях теории растворов электролитов, внёс Б. М. Ларин с сотрудниками (ИГЭУ).

Авдеева А.А. и Акользин П.А. для контроля внутренней эксплуатационной коррозии паровых котлов использовали водородометрию. Вайнман А.Б., Манькина Н.Н. показали связь концентрации водорода в паре котла с щёлоче-фосфатным отношением котловой воды.

В практике водоподготовки теплоэнергетических объектов возможны технологические нарушения, обусловленные микробиологическими процессами, и существует необходимость подготовки соответствующих методов диагностики и выбора доступных и эффективных способов предотвращения данных нарушений. ПТЭ ЭС и С предпринимают принятие антибактериальных мер. Рекомендаций по диагностике таких нарушений для ВПУ в нормативных документах не приводится.

По данным зарубежных фирм (Дегремон, Веолиа и др.) в оборудовании и трубопроводах водоподготовительных установок наиболее вероятны процессы с участием аэробных, например, нитрифицирующих бактерий. ВПУ котлов средних давлений, а иногда и котлов высоких давлений (9,8 МПа), не обеспечивают очистку воды от нитритов и нитратов. Именно поэтому зафиксированы аварийные остановы таких котлов (ВТИ, ИГЭУ), вызванные нитритной коррозией экранных труб из-за жизнедеятельности нитрифицирующих бактерий. Существование

аэробных бактерий можно обнаружить по изменению химических параметров качества воды, в частности, по изменению массовых концентраций соединений аммонийного азота, нитритов и нитратов, кислорода, рН.

Интегральным показателем степени загрязнённости воды бактериями служит широко известный и используемый в микробиологии показатель – микробное число – общее количество микроорганизмов в определённом объёме воды. Определение микробного числа требует наличия специфических условий, отсутствующих, как правило, на ТЭС. Методы косвенного контроля, основанные на определении химических веществ, участвующих в микробиологических процессах, более применимы в энергетике. В этом плане наиболее перспективно использование кислородометрии. Однако для обоснования её применения требуется проведение исследований.

Необходимо изучение бактериальных процессов, обобщение и анализ накопленного опыта с учётом того, что эксплуатационные затруднения могут быть вызваны непосредственно бактериями и продуктами их жизнедеятельности. Требуется проверка эффективности и оптимизация защитных антибактериальных мер.

В составе российской энергетики продолжают работать ТЭЦ среднего давления, строятся новые парогазовые ТЭЦ, использующие умягчённую добавочную воду. При отпуске пара на производство и неполном возврате на ТЭЦ конденсата их персонал сталкивается с проблемой сверхнормативной загрязнённости конденсата продуктами коррозии, нередко производится сброс загрязнённого конденсата. ТЭЦ и предприятия терпят убытки. Для их исключения требуется обоснование необходимости и разработка мероприятий по эффективному контролю и подавлению внутренней коррозии трубопроводов конденсата, что может быть достигнуто с использованием зависимостей технологических характеристик (закономерностей) массообмена при внутренней коррозии. Для их получения необходимы сведения о значениях скорости коррозии, о коэффициентах сноса продуктов коррозии в зависимости от режимных факторов (массовой концентрации кислорода, скорости конденсатного потока и др.). Опубликованные сведения недостаточны для определения закономерностей массообмена. Требуется дополнительные данные. Существование и строительство ТЭЦ, имеющих проблему с возвратом конденсата, показывает недостаточную эффективность предусмотренных противокоррозионных мер. Это относится к текстильным предприятиям, потребляющим пар, на которых технологически неизбежно загрязнение конденсата воздухом. На таких

предприятиях целесообразна деаэрация конденсата перед отправкой на ТЭЦ.

Не редки случаи работы тепловых сетей при некачественной деаэрации подпиточной воды, что приводит к дополнительным затратам. Закрытые тепловые сети характеризуются малым расходом подпиточной воды. При её некачественной деаэрации создаётся неверное впечатление незначительности внутренней коррозии. При увеличенной концентрации кислорода в подпиточной воде наиболее вероятны коррозионные повреждения водогрейного оборудования и начального участка трубопроводов прямой сетевой воды. Требуется знание закономерностей, использование которых позволит определить влияние некачественной деаэрации на коррозионный износ трубопроводов и загрязнение сетевой воды продуктами коррозии.

Литературные данные (Маргулова Т. Х. и др.) свидетельствуют, что при температуре воды не более 150 °С можно, как правило, не учитывать образование водорода при дегидрировании её органических примесей. Водород может выделяться в такой «холодной» воде в результате «классической» электрохимической и микробиологической коррозий. Таким образом, измеряя (Жук Н.П.) уменьшение концентрации кислорода и увеличение концентрации водорода в воде (конденсате), можно оценить относительный вклад основных реакций деполаризации катодов и сделать заключение, в какой мере является кислород основным катодным деполаризатором внутренней коррозии трубопроводов с «кислыми» конденсатом и сетевой водой. Ответ на этот вопрос необходим для разработки закономерностей массообмена при внутренней коррозии трубопроводов.

Контроль коррозии с использованием индикаторов (образцов) выполняется обычно дважды в год. Определение массовой концентрации соединений железа, являющихся продуктами коррозии, трудоёмко и не входит в объём оперативного контроля. Таким образом, особое внимание уделяется методам косвенного контроля коррозии металла по содержанию коррозионного агента (например, кислорода) и по содержанию продукта коррозии, например, водорода. Эти методы известны, но информативность их должна быть повышена, что может быть достигнуто при использовании зависимостей технологических характеристик массообмена при коррозии. Изменение массовых концентраций кислорода и водорода в теплоносителе может служить количественным критерием оценки скорости коррозии.

Простота оперативного определения скорости коррозии стали по уменьшению концентрации кислорода в воде или по «водородному числу» может быть реализована лишь при выполнении ряда условий.

Во-первых, определить можно лишь усреднённую скорость коррозии (локализация коррозии не исследована). Во-вторых, следует знать состав первичных промежуточных продуктов коррозии, расход кислорода или выход водорода в реакциях коррозии.

Таким образом, требуются исследования, направленные на расширение диагностических возможностей системы химического контроля при нарушениях ВХР и совершенствование защитных мероприятий. При этом в рамках данной работы следует обеспечить достижение выше указанных целей.

**Во второй главе** описаны условия и методика экспериментальных исследований.

Стендовое экспериментальное исследование биохимического потребления кислорода при механическом осветлении воды проведено с использованием модели механического фильтра (стеклопластик, диаметр 300 мм, высота корпуса 3000 мм, трубопроводы из ПВХ, загрузка – кварцевый песок), оборудованного расходомером и включенного параллельно рабочим механическим фильтрам ВПУ ТСЦ ОАО «Северсталь» (рис.1).



Рис. 1. Модель механического фильтра

Последующие экспериментальные исследования биохимического потребления кислорода при механическом осветлении и Na-катионировании воды, исследования коррозии стали 20 трубопроводов возвратного конденсата и тепловых сетей выполнены в промышленных условиях на работающем оборудовании ВПУ ТСЦ и Ивановской ТЭЦ-1. На ВПУ

ТСЦ (исходная вода р. Шексна) установлены механические фильтры с кварцевым песком (высоты загрузочных слоёв кварцевого песка диаметром зёрен от 0,7 до 1,1 мм механических фильтров: стендового и рабочих равны 2 м, скорости фильтрации до 10 м/ч) и противоточные двухкамерные Na-катионитные фильтры (Schwebbett, загружены катионитом PPC-100, общая высота слоёв катионита в двух камерах 2770 мм, общая высота слоёв инерта в двух камерах 600 мм, рабочая скорость фильтрации от 15 до 40 м/ч диаметрами 3800 мм. Все фильтры и трубопроводы ВПУ имеют надёжные антикоррозионные покрытия. Окисляемость исходной воды в течение года изменяется от 12 до 17 мг

$O_2/дм^3$ . Присутствие железоорганики и бактерий в воде приводит к загрязнению катионита и увеличению удельного расхода соли на его регенерацию. Для подавления жизнедеятельности бактерий имеется установка периодического пропорционального дозирования гипохлорита натрия (ГХН) в исходную воду.

В состав ВПУ Ивановской ТЭЦ-1 (исходная вода р. Уводь) входят механические фильтры с антрацитной загрузкой и фильтры  $Na/NH_4^-$  и  $Na/Cl^-$  ионирования.

Потребителями химически очищенных вод указанных ВПУ являются котлы среднего давления.

Массовые концентрации кислорода и водорода в воде определялись амперометрическими мембранными кислородомером МАРК-302Т и водородомером МАВР-504. Другие химические параметры качества вод (конденсатов) определялись также по стандартизованным методикам. Микробное число определялось методом прямого подсчета количества микроорганизмов с помощью специальной камеры и светового микроскопа (ИГМА, Горбунов А.В.). Фазовый состав продуктов коррозии определён с использованием мессбауэровской спектроскопии.

Среднее значение скорости коррозии определялось по РД 153-34.117.465-00 с использованием образцов стали - индикаторов коррозии, устанавливаемых в трубопроводы. Методика измерений, приведённая в указанном РД, была дополнена для создания возможности определения коэффициента сноса продуктов коррозии.

Теплотехнические параметры режимов работы оборудования измерены с использованием штатных поверенных приборов.

**В третьей главе** приведены результаты экспериментальных исследований биохимического потребления кислорода для проверки возможности использования массовой концентрации кислорода в качестве контролируемого параметра, изменяющегося в биохимических процессах, и проверка антибактериальной эффективности взрыхляющих промывок фильтров и обработки воды гипохлоритом натрия.

Первичная оценка возможности применения кислородометрии для обнаружения и исследования микробиологических процессов при водоподготовке выполнена на Ивановской ТЭЦ-1. Окисляемость исходной воды в период испытаний составила около  $9 \text{ мг } O_2/дм^3$ . Наличие аммоний-катионирования в схеме ВПУ устраняло торможение реакции нитрификации со стороны азота аммонийного и обеспечило возможность значительного биохимического потребления кислорода. При концентрации кислорода в исходной воде, равной  $8,0 \text{ мг/дм}^3$ , малой скорости фильтрации (от 6 до 10 м/ч) его минимальная концентрация в химически очищенной воде составляла от 20 до 30  $\text{мкг/дм}^3$ . Это указа-

ло на возможность использования кислородометрии для контроля бактериальных процессов.

Результаты стендового исследования приведены на рис. 2. Они подтверждают существование на ВПУ ТСЦ процессов с участием нитрифицирующих бактерий и показывают зависимость биохимического потребления кислорода и выхода нитритов в опытном фильтре от скорости фильтрации. Эта зависимость объясняется влиянием времени пребывания воды в бактериально загрязнённом фильтре.

Одновременно производились измерения на работающей ВПУ, включающей в свой состав механические фильтры и двухкамерные Накатионитные противоточные фильтры, Массовая концентрация аммиака в исходной воде ВПУ (р. Шексна) во время опытов не превышала  $0,2 \text{ мг/дм}^3$ . Окисляемость исходной воды была в диапазоне от 14 до  $17 \text{ мг/дм}^3$ . Опытные данные приведены на рис. 3. Установлены наличие

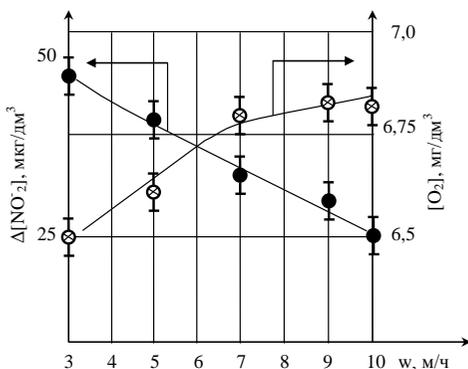


Рис. 2. Результаты стендовых опытов по исследованию биохимического потребления кислорода механическим фильтром:

$[\text{O}_2]$  – массовая концентрация кислорода в осветлённой воде;  $\Delta[\text{NO}_2^-]$  – выход нитритов при осветлении воды. Исходное состояние модели фильтра: выработка фильтрата соответствует гидравлическому сопротивлению загрузки  $1 \text{ кгс/см}^2$  при скорости фильтрации  $10 \text{ м/ч}$ . Взрыхляющая промывка не проведена

корреляции между потреблением кислорода в фильтре и выходом нитритов, положительный антибактериальный эффект выносной взрыхляющей промывки катионита.

Как стендовые, так и промышленные опыты показывают возможность применения кислородометрии для обнаружения микробиологических процессов на ВПУ и оценки их интенсивности; влияние времени пребывания воды в фильтрах на биохимическое потребление кислорода; возможность оценки эффективности анти-

бактериальных мероприятий, например, взрыхляющих промывок, хлорирования и др. по изменению биохимического потребления кислорода фильтрами ВПУ.

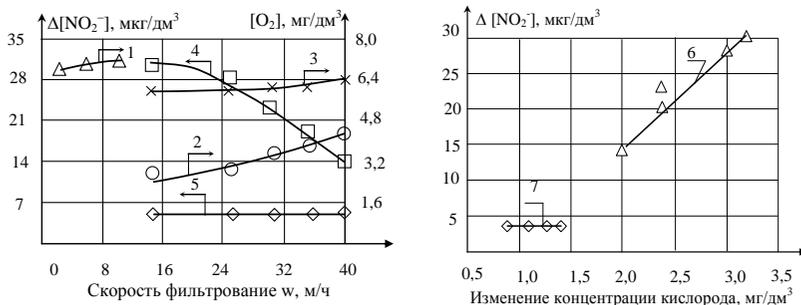


Рис. 3. Результаты промышленных опытов по исследованию биохимического потребления кислорода фильтрами водоподготовительной установки:

1 – массовая концентрация кислорода ( $[\text{O}_2]$ ) в осветленной воде перед взрыхляющей промывкой механического фильтра; 2, 3 – массовая концентрация кислорода ( $[\text{O}_2]$ ) в умягчённой Na-фильтром воде, соответственно, перед выносной восстановительной промывкой катионита (Schwebbett) и после неё; 4, 5 – выход нитритов ( $[\Delta\text{NO}_2]$ ) в Na-фильтре, соответственно, перед выносной восстановительной промывкой катионита и после неё; 6, 7 – результаты совместных измерений концентрации кислорода и выхода нитритов. (6 – до восстановительной обработки катионита, 7 – соответственно, после неё)

Кислородометрия использована для оценки эффективности дозровок окислительного биоцида, гипохлорита натрия, на ВПУ ТСЦ ОАО «Северсталь» (см. табл. 1).

Таблица 1. Результаты контроля эффективности антибактериальной обработки воды

Производственные воды	ХВО ТСЦ ОАО «Северсталь»		Ивановская ТЭЦ-1	
	Микробное число	$[\text{O}_2]$ , мг/дм <sup>3</sup>	Микробное число	$[\text{O}_2]$ , мг/дм <sup>3</sup>
Исходная вода	400 ± 10	7,6 ± 0,1	600 ± 8	7,5
Умягченная вода без обработки ГХН	240 ± 70	2,6 ± 0,1	300 ± 30	0,02
Умягченная вода после разовой обработки исходной воды ГХН (1 мг/дм <sup>3</sup> Cl <sub>2</sub> )	150 ± 40	6,9 ± 0,1	-	-
То же (4 мг/дм <sup>3</sup> Cl <sub>2</sub> )	40 ± 10	7,4 ± 0,1	-	-

Данные табл. 1 подтверждают возможность косвенного контроля жизнедеятельности бактерий в закрытых системах по массовой кон-

центрации кислорода в воде. Обработка воды гипохлоритом натрия (ГХН) подавляет жизнедеятельность бактерий, что обнаруживается как путём определения микробных чисел воды, так и массовых концентраций кислорода в ней. Взрыхляющие промывки фильтров, в том числе, выносные промывки ионитов фильтров Schwebbett эффективны как антибактериальные мероприятия.

**В четвёртой главе** на основании промышленных опытов представлены данные о фазовом составе продуктов коррозии стали, показана определяющая роль реакций кислородной деполаризации внутренней коррозии трубопроводов возвратного конденсата ( $pH_{25}$  от 5,7 до 6,7) и сетевой воды, экспериментальные и расчётные данные об экспуатационной коррозии трубопровода возвратного кислого конденсата пара, произведённого на ТЭЦ из щелочной умягчённой воды; приведены закономерности массообмена при коррозии, позволяющие рассчитывать концентрацию её продуктов в зависимости от начальной концентрации кислорода в конденсате, расхода конденсата, диаметра и длины трубопровода; показана необходимость установления требований к содержанию кислорода в конденсате, возвращаемом на ТЭЦ.

В реакциях коррозии образуются гидроксиды, гидратированные и дегидратированные оксиды, определяемые при фазовом анализе продуктов коррозии. Относительный выход водорода в реакциях образования оксидов больше, чем в реакциях образования гидроксидов. Гидроксиды являются промежуточными продуктами коррозии. В нагретой воде они термодинамически неустойчивы и разлагаются с выделением водорода.

Фазовым анализом установлено преобладание в нерастворимой части примесей кислого ( $pH_{25}$  от 5,7 до 6,7) конденсата легко транспортируемых, гидратированных продуктов коррозии  $Fe(OH)_2$ ,  $\alpha-FeOOH$ ,  $\alpha-Fe_2O_3$ ,  $nH_2O$ . В сетевой воде в составе продуктов коррозии также присутствуют в большинстве эти соединения. Отложения на индикаторах коррозии и стенке трубопровода содержат большей частью дегидратированный оксид железа (III). Получены дополнительные данные, подтверждающие образование в качестве фазовых промежуточных продуктов коррозии гидратированных соединений железа (II) -  $Fe(OH)_2$ , впоследствии окисляющихся, дегидратирующихся и дегидрирующихся в основном, до соединений железа (III) -  $\alpha-FeOOH$ ,  $\alpha-Fe_2O_3$  и  $\alpha-Fe_2O_3$ ,  $nH_2O$ . Таким образом, получено дополнительное подтверждение того, что первичные анодные и катодные реакции сопровождаются переносом двух электронов в расчёте на один атом железа.

Результаты лабораторных исследований по определению фазового состава продуктов коррозии приведены в табл. 2.

**Таблица 2. Фазовый состав продуктов коррозии стали 20 (коррозия в возвратном кислом конденсате и в сетевой воде. Мёссбауэровская спектроскопия, д. ф.-м. н. М. Н. Шипко)**

Место отбора проб продуктов коррозии	Фазовый состав
ОАО «ЗиМа», индикатор коррозии в трубопроводе после конденсатного насоса (длительность испытаний 3 мес.)	$\alpha$ -FeOOH (40 %) $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·nH <sub>2</sub> O и $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> · (50 %), Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (5 %)
Стенка трубопровода конденсата на напоре конденсатного насоса	$\alpha$ -FeOOH (30 %) $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (60 %), $\gamma$ -Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (5 %)
Возвратный конденсат (трубопровод отбора проб на ТЭЦ). Отбор пробы с использованием фильтра	Fe(OH) <sub>2</sub> (20 %) $\alpha$ -FeOOH (55 %) $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·nH <sub>2</sub> O (20 %)
Контур открытой теплосети Ивановской ТЭЦ-2. Индикатор коррозии. Подающий («прямой») трубопровод (длительность испытаний 7 мес.)	$\alpha$ -FeOOH (30 %) $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (60 %), $\gamma$ -Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (5 %)
Контур открытой теплосети Ивановской ТЭЦ-2. Подающий («прямой») трубопровод. Сетевая вода	Fe(OH) <sub>2</sub> (30 %) $\alpha$ -FeOOH (35 %) $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> и $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·nH <sub>2</sub> O (30 %)
Закрытая локальная теплосеть. Подающий трубопровод. Отсутствует деаэрация подпиточной воды. Пластинчатый индикатор коррозии (длительность испытаний 7 мес.)	$\alpha$ -FeOOH (20 %) $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (70 %) $\gamma$ -Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (5 %)
Закрытая локальная теплосеть. Подающий («прямой») трубопровод. Отсутствует деаэрация подпиточной воды. Сетевая вода	Fe(OH) <sub>2</sub> (20 %) $\alpha$ -FeOOH (30 %) $\alpha$ -Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (40 %)

В промышленных опытах установлена связь выхода продуктов коррозии с уменьшением концентрации кислорода и выходом водорода. Результаты измерений, выполненных на ОАО «ЗиМа» и Ивановской ТЭЦ-1, приведены на рис. 4 и 5.

Доля коррозии стали с катодным выделением водорода не превысила в опытах на трубопроводе «кислого» конденсата 6 % (при концентрации кислорода в диапазоне от 0,4 до 1,0 мг/дм<sup>3</sup>) и 8 % (при концентрации кислорода в диапазоне от 0,1 до 0,3 мг/дм<sup>3</sup>), увеличиваясь в сопоставимых условиях при уменьшении концентрации кислорода. Данные водородометрии подтверждают предположение о преобладании коррозии с кислородной деполяризацией катодов, что согласуется с данными других авторов. Аналогичные выводы получены в отношении коррозии подающих трубопроводов тепловых сетей, работающих с повышенным содержанием кислорода в подпиточной воде.

Данные кислородометрии согласуются с результатами измерений скорости коррозии с использованием индикаторов. Сравнительную (дифференциальную) кислородометрию можно рекомендовать для организации непрерывного косвенного контроля за коррозией трубопроводов конденсата и тепловых сетей.

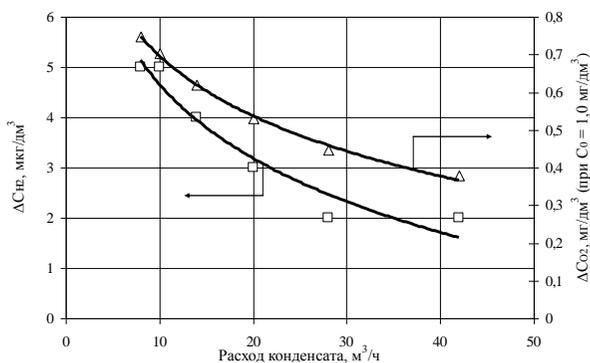


Рис. 4. Зависимость изменения концентраций водорода ( $\Delta C_{H_2}$ ) и кислорода ( $\Delta C_{O_2}$ ) в конденсате от его расхода при транспорте от промышленного предприятия до ТЭЦ (трубопровод диаметром 89 мм и длиной 1300 м)

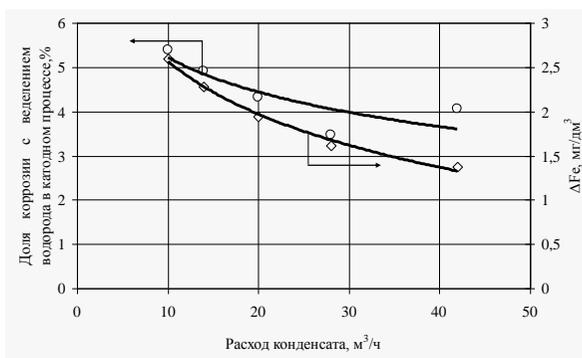


Рис. 5. Зависимость изменения концентрации продуктов коррозии в конденсате в пересчёте на Fe и доли коррозии с выделением водорода от расхода конденсата при его транспорте от промышленного предприятия до ТЭЦ по трубопроводу диаметром 89 мм и длиной 1300 м

При разработке закономерностей (зависимостей технологических характеристик) массообмена при коррозии стали в конденсате и сете-

вой воде использована её зависимость от массовой концентрации кислорода. При этом учтено следующее:

1) коррозия стали протекает с диффузионным контролем катодной реакции восстановления кислорода. Стационарное значение скорости коррозии в присутствии свободной угольной кислоты прямо пропорционально концентрации кислорода в конденсате

$$V_k = (K_{\text{диф}} \cdot C_{O_2} \cdot 3600/\delta) \cdot X_k,$$

где  $X_k$  – доля площади катодов;  $K_{\text{диф}}$  – коэффициент диффузии;  $\delta$  – толщина диффузионного слоя;  $C_{O_2}$  – массовая концентрация кислорода.

$$V_k = K_y \cdot C_{O_2},$$

где  $K_y$  – условная константа скорости коррозии, определяемая экспериментально;

2) условная константа скорости коррозии ( $K_y$ ) зависит от скорости ( $W$ ) потока воды (конденсата). Эта зависимость для области температур конденсата от 70 до 80 °С определена с использованием литературных данных:

$$K_y = K_{y1} (0,03927 \ln W + 1,408),$$

где  $K_{y1}$  – условная константа скорости коррозии при скорости потока воды (конденсата), равной 1 м/с;

3) влияние свободной угольной кислоты и концентрации кислорода на снос продуктов коррозии стали учтено на основании экспериментальных данных, собранных с участием автора, и представлено в виде зависимости:

$$K_{\text{сноса}} = f(V_k);$$

4) промежуточными продуктами коррозии являются соединения железа (II), которые в дальнейшем окисляются до соединений железа (III).

При этих условиях и рассмотрении трубопровода как реактора идеального вытеснения определяющая закономерность - зависимость относительного текущего значения концентрации кислорода в конденсате ( $C/C_0$ ) от его расхода ( $Q$ , м<sup>3</sup>/ч), диаметра ( $D$ , м) и длины ( $L$ , м) трубопровода имеет вид:

$$C/C_0 = \exp(-\pi DL K_y/Q),$$

где  $C_0$ ,  $C$  – соответственно, концентрации кислорода в конденсате в начальном участке корродирующего трубопровода ( $L = 0$ ) и в конденсате на расстоянии  $L$  от начала трубопровода, мг/дм<sup>3</sup>;  $D$ , м – внутренний диаметр трубопровода конденсата;  $K_y$  – определённая экспериментально условная константа скорости коррозии углеродистой стали.

Для получения закономерностей массообмена при внутренней эксплуатационной коррозии трубопровода выполнены измерения и расчёты для Ивановской ТЭЦ-1 с котлами, работающими на умягчённой Na-катионированием воде (в настоящее время эта ТЭЦ распола-

гает Na-, NH<sub>4</sub>/Na-, Na/Cl- фильтрами), и ПГ ТЭЦ ЗАО «Родниковская энергетическая компания» при Na-катионировании исходной воды. Перекачка возвратного конденсата на ИвТЭЦ-1 выполнялась сплошным поперечным сечением трубопровода. В указанных условиях по длине трубопровода одновременно уменьшаются концентрация кислорода и скорость внутренней коррозии стали в возвратном конденсате.

Таблица 3. Поступление продуктов коррозии с возвратным конденсатом на ТЭЦ

Q, м <sup>3</sup> /ч	C/C <sub>0</sub> при L = 1300 м	Массовый поток продуктов коррозии в пересчете на Fe, г/ч (L = 1300 м)		Массовая концентрация продуктов коррозии в пересчете на Fe, мг/дм <sup>3</sup> (L = 1300 м)	
		при C <sub>0</sub> = 1,0 мг/дм <sup>3</sup>	при C <sub>0</sub> = 0,1 мг/дм <sup>3</sup>	при C <sub>0</sub> = 1,0 мг/дм <sup>3</sup>	при C <sub>0</sub> = 0,1 мг/дм <sup>3</sup>
		8	0,2514	12,576	1,576
10	0,2983 [0,305]	14,736 [15,1]	1,842 [2,00]	1,474 [1,51]	0,184 [0,200]
14	0,3799 [0,395]	18,231 [19,6]	2,2785 [2,45]	1,302 [1,40]	0,163 [0,175]
20	0,4697 [0,450]	22,273 [22,0]	2,784 [3,00]	1,114 [1,10]	0,139 [0,150]
28	0,5534 [0,570]	26,260 [27,7]	3,282 [3,50]	0,938 [0,990]	0,117[0,125]
42	0,6219	33,348	4,167	0,794	0,099

В табл. 3 приведены результаты расчётов и измерений относительной концентрации кислорода, массовых расхода и концентрации продуктов коррозии в пересчёте на Fe на выходе из трубопровода диаметром 89 мм, длиной 1300 м (вход ТЭЦ), при значениях C<sub>0</sub>, равных 0,1 и 1,0 мг/дм<sup>3</sup>. Расчёты выполнены для различных значений расхода возвратного конденсата текстильного предприятия ОАО «ЗиМа» (г. Иваново) и коэффициента сноса продуктов коррозии: вне скобок – расчётные значения при фактически наблюдаемом сносе продуктов коррозии в кислый конденсат ИвТЭЦ-1 (средние значения K<sub>сн</sub> = 0,75 при C<sub>0</sub> менее 0,3 мг/дм<sup>3</sup> и K<sub>сн</sub> = 0,6 при C<sub>0</sub> не менее 1,0 мг/дм<sup>3</sup>), в квадратных скобках – результаты измерений (фактические значения).

Следует подчеркнуть, что коэффициенты сноса продуктов коррозии определены для трубопровода, транспортирующего конденсат, имеющий рН<sub>25</sub> в диапазоне от 5,7 до 6,7.

Данные табл. 3 показывают сходимость экспериментальных и расчётных значений показателей качества конденсата, что свидетель-

стует об адекватности математического описания технологических характеристик массообмена при внутренней коррозии трубопровода конденсата; уменьшение массовой концентрации продуктов коррозии в конденсате, поступившем на ТЭЦ, при увеличении расхода конденсата (причиной этого является диффузионное ограничение потребления кислорода в процессе коррозии); не прямо пропорциональное увеличение массового расхода продуктов коррозии при увеличении расхода конденсата по трубопроводу; необходимость эффективной защиты конденсата от аэрации или необходимость его деаэрации.

К сожалению, при проектировании ТЭЦ, как правило, не выполнялся учёт фактического состояния пароконденсатного хозяйства производства – потребителя пара. При наличии требований ПТЭ ЭС и С к качеству возвратного конденсата, поступающего на ТЭЦ, отсутствуют требования к его качеству на входе в транспортирующий трубопровод. Это затрудняет выполнение требований ПТЭ ЭС и С и становится причиной сброса конденсата, загрязнённого продуктами коррозии, и потерь тепла.

Полученные технологические характеристики массообмена при коррозии позволяют установить допустимое содержание кислорода на входе в трубопровод конденсата по условию его приёма ТЭЦ. Например, для Ивановской ТЭЦ-1 при длине трубопровода 1300 м допустимая (по условию:  $[Fe]$  не более  $0,1 \text{ мг/дм}^3$ ) концентрация кислорода составляет:

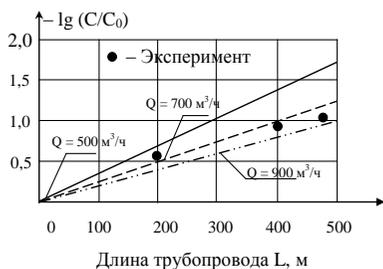


Рис. 6 Изменение концентрации кислорода при коррозии начального участка теплосети

- $0,1 \text{ мг/дм}^3$  при работе этого трубопровода с полной гидравлической нагрузкой;
- не более  $0,05 \text{ мг/дм}^3$  при его работе во всём диапазоне рабочих гидравлических нагрузок.

Проверка применимости зависимостей, описывающих массообмен при внутренней коррозии трубопроводов конденсата, для описания массообмена при внутренней коррозии начального участка

напорного трубопровода тепловых сетей выполнена с использованием данных эксплуатационного контроля ряда ТЭЦ и предприятия тепловых сетей, эксплуатируемых с нарушением требования ПТЭ Э и С к содержанию кислорода в прямой сетевой воде.

Эти данные (например, рис. 6) подтверждают применимость указанных зависимостей при экспериментальном определении условной константы скорости коррозии, что связано с необходимостью учесть влияние химического состава примесей воды на перенапряжение восстановления кислорода в катодном процессе, либо на локальные анодные процессы. Несмотря на эту необходимость, косвенное определение скорости коррозии по изменению концентрации кислорода в воде вполне возможно, что объясняется стехиометричностью его расхода при коррозии. При этом дополнительно измеряемым параметром является расход воды (конденсата).

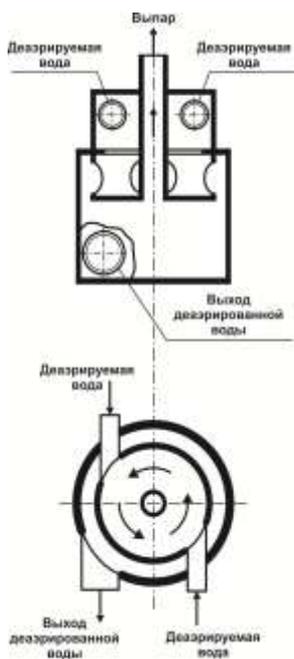


Рис. 7. Конструктивная схема деаэрационного устройства

**В пятой главе** показана целесообразность термической деаэрации возвратного конденсата на предприятии – потребителе пара перед перекачкой этого конденсата на ТЭЦ, и рассмотрено применение центробежных вихревых деаэраторов ДЦВ перегретой воды для защиты от эксплуатационной коррозии трубопроводов конденсата и тепловых сетей.

На производственных, например, текстильных предприятиях имеется технологическое пароиспользующее оборудование, исключение азрации конденсата в котором затруднено или невозможно. В данном случае эффективным мероприятием защиты от загрязнения конденсата продуктами коррозии является деаэрация конденсата перед его подачей в трубопровод возврата. Учитывая состояние и особенности обслуживания пароконденсатных хозяйств промышленных предприятий, рекомендовано проведение вакуумной или атмосферной деаэрации с использованием дешёвых и простых в эксплуатации центробежных деаэрационных устройств ДЦВ (разработчик Б. А. Зимин), являющихся прямоточными деаэраторами перегретой воды. Технологические характеристики этих аппаратов изучены недостаточно. Это показал процесс их внедрения. Определение условий эффективного обескислороживания и декарбонизации подпиточной воды теплосети и, следовательно, кон-

онных устройств ДЦВ (разработчик Б. А. Зимин), являющихся прямоточными деаэраторами перегретой воды. Технологические характеристики этих аппаратов изучены недостаточно. Это показал процесс их внедрения. Определение условий эффективного обескислороживания и декарбонизации подпиточной воды теплосети и, следовательно, кон-

денсата выполнено на прототипе деаэрационной установки с деаэратором ДЦВ (рис. 7), установленного при реконструкции деаэратора ДСА-150, г Кольчугино.

Основными факторами, определяющими эффективность деаэрации перегретой воды, являются её температура и связанный с этой температурой удельный расход выпара. В результате испытаний двух параллельно работающих деаэраторов получена зависимость концентрации кислорода и  $pH_{25}$  деаэрированной воды от температуры перегретой воды и от относительного расхода выпара (рис. 8).

Установлено, что удовлетворительный результат деаэрации достигается при удельном расходе выпара около 10 кг/т. Для уменьшения высоты площадки размещения деаэратора рекомендуется уменьшить рабочий вакуум в деаэраторе. С этой целью необходимо увеличить расчётную температуру деаэрируемой воды (конденсата) до 80 °С.

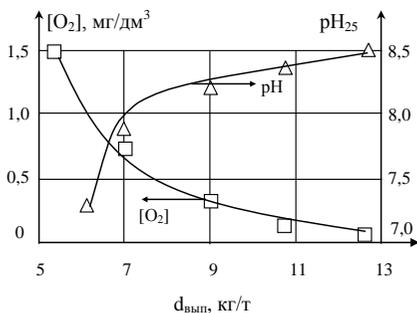


Рис. 8. Зависимость массовой концентрации кислорода ( $[O_2]$ ) в деаэрированной воде при температуре 65 °С от удельного расхода выпара ( $d_{\text{вып}}$ ) деаэратора ДЦВ

Возможно использование атмосферного варианта центробежного деаэратора ДЦА. В данном случае для увеличения температуры деаэрации потребуется кожухорубный подогреватель. Применение для этой цели пароструйных подогревателей при наличии пара, содержащего значительное количество свободной угольной кислоты, не целесообразно. Сведения об

условиях эффективного применения деаэрационных устройств переданы фирме-изготовителю (ЗАО «Регион-Бизнес»), парогазовой ТЭЦ (г. Родники) и учтены при проектировании реконструкции деаэрационной установки для Печорской ГРЭС.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Для совершенствования водно-химического режима ТЭЦ среднего давления, использующих умягчённую добавочную воду, посредством предотвращения бактериальных процессов на ВПУ и внутренней коррозии трубопроводов при увеличении диагностических возможностей существующих систем химико-технологического контроля:

1.1. Исследовано биохимическое потребление кислорода и получены его зависимости от технологических факторов на опытном стенде и в водоподготовительных установках. Показана возможность использования кислородометрии для оценки интенсивности микробиологических процессов в оборудовании водоподготовки и антибактериальная эффективность взрыхляющих промывок и обработки воды гипохлоритом натрия.

1.2. Получены новые данные о внутренней эксплуатационной коррозии углеродистой стали в кислом конденсате; определён относительный вклад катодных реакций с потреблением кислорода и выделением водорода в воду при внутренней эксплуатационной коррозии трубопроводов этого конденсата и тепловых сетей. Вклад реакций с потреблением кислорода (около 94 %) является определяющим.

Исследован массообмен при внутренней коррозии трубопровода кислого конденсата, определены зависимости его технологических характеристик от режимных факторов и обоснована технологическая эффективность защиты трубопровода от внутренней коррозии посредством деаэрации возвратного конденсата.

1.3. Показана применимость аналогичных зависимостей для описания внутренней коррозии начальных участков трубопроводов тепловых сетей.

1.4. Определены условия эффективного применения центробежных деаэраторов перегретой воды для защиты от эксплуатационной внутренней коррозии трубопроводов конденсата и тепловых сетей.

## **2. С использованием результатов работы:**

2.1. Выполнено определение условий антибактериальной обработки воды на водоподготовительной установке ХВО ТСЦ ЧерМК ОАО «Северсталь».

2.2. Разработаны и переданы для реализации ряду предприятий энергетики (ИВТЭЦ-1, ПГ ТЭЦ ЗАО «РЭК», ЗАО «Регион-Бизнес», ОАО «Тепломонтажналадка» – г. Кострома и др.) рекомендации по увеличению информативности контроля внутренней коррозии трубопроводов конденсата и тепловых сетей и по применению центробежных прямоточных деаэраторов.

### **Основные положения диссертации отражены в следующих работах:**

*в изданиях, рекомендованных ВАК:*

1. Виноградов В.Н., Аван В.К. Водородометрия при диагностике водно-химических режимов котлов ТЭС // Вестник ИГЭУ. 2010. №2. С. 19-21.

2. Виноградов В.Н., Шатова И.А., **Аван В.К.**, Шувалов А.В. Особенности внутренней коррозии тепловых сетей // Вестник ИГЭУ. 2010. № 4. С. 19-22.

*в других изданиях:*

3. Виноградов В.Н., Горбунов А.В., **Аван В.К.** Бактериальные нарушения водоподготовки и микробиологический контроль качества воды // Повышение эффективности работы энергосистем // Труды ИГЭУ, выпуск IX. 2009. С. 168-174.

4. Виноградов В.Н., Горбунов А.В., **Аван В.К.** Применение кислородомеров и водородомеров в диагностике водоподготовки при бактериальном Заражении воды // Моделирование энергоресурсосберегающих технологий, Межрегиональная научно-практическая конф. // Волжский 2009. С. 188-194.

5. Виноградов В.Н., Горбунов А.В., **Аван В.К.** Применение кислородомеров и водородомеров в диагностике нарушений водно-химического режима ТЭС. //Тез. докл. XVI научно-техническая конф. студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» // МЭИ. 2010. Т. 3. С. 146-148.

6. Виноградов В.Н., Батти М.К.Л., **Аван В.К.** Диагностика коррозионных и бактериальных проблем ТЭС с применением газового анализа // Тез. докл. конф. молодых ученых центрального федерального округа «Актуальные направления научных исследований» г. Калуга. 2009. С. 172-174.

7. Виноградов В.Н., **Аван В.К.** Влияние водорода на водно-химический режим котлов ТЭС // Тез. докл. V международная и научная конф. // «Тинчуринские чтения» Казань. 2010. Т. 2. С. 159-160.

8. Виноградов В.Н., **Аван В.К.** Об учёте тепловых параметров пароводяных подогревателей воды при нормировании её качества // Тез. докл. V Региональная научно-техническая конф. студентов и аспирантов «Теплоэнергетика» // Иваново. 2010 Т.1. С. 143-145.

9. Шатова И.А., **Аван В.К.** Повышение информативности контроля внутренней коррозии тепловых сетей, систем водяного охлаждения и трубопроводов конденсата // Тез. докл. V Региональная научно-техническая конф. студентов и аспирантов «Теплоэнергетика» // Иваново. 2010 Т.1. С. 145-148.

10. Виноградов В.Н., Шатова И.А., **Аван В.К.**, Шувалов А.В. Особенности нормирования качества сетевых вод и увеличение информативности контроля внутренней коррозии тепловых сетей, трубопроводов конденсата и систем охлаждения // V юбилейная всероссийская научно-практическая конф. // Иваново. 2010 С. 192-197.

АВАН ВАСИМ КАЙСИР

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ВОДНО-ХИМИЧЕСКОГО  
РЕЖИМА ТЭЦ СРЕДНЕГО ДАВЛЕНИЯ**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

подписано в печать .....Формат 60x84 1/16

печать плоская. Усл. Печ. л.1,39

Тираж 100 экз. Заказ №.....ГОУ ВПО “Ивановский государ-  
ственный энергетический университет им. В.И. Ленина”

153003, Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ.