



КОЛЕГОВ Антон Валерьевич

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО  
ХИМКОНТРОЛЯ БАРАБАННЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ  
НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ И pH**

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

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Химия и химические технологии в энергетике» ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»

**Научный руководитель**      **Ларин Андрей Борисович**  
кандидат технических наук, доцент

**Официальные оппоненты:**    **Барочкин Евгений Витальевич**,  
доктор технических наук, доцент,  
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина», заведующий кафедрой «Тепловые электрические станции»

**Киет Станислав Викторович**,  
кандидат технических наук,  
ООО «НПП «Техноприбор», заместитель  
генерального директора

**Ведущая организация**      ОАО «Фирма ОРГРЭС», г. Москва

Защита состоится «30» мая 2013 года в 14<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 301.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим присылать по адресу: 153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Ученый совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, 26-98-61, факс: (4932) 38-57-01.  
e-mail: [uch\\_sovet@ispu.ru](mailto:uch_sovet@ispu.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

Автореферат разослан «29» апреля 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор технических наук, профессор



Шувалов Сергей Ильич

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### **Актуальность темы**

В настоящее время для контроля качества питательной и котловой воды применяются как титриметрические, так и приборные методы. Традиционные методы лабораторного химического контроля, как правило, трудоемки и не позволяют получать оперативную информацию для управления водно-химическим режимом (ВХР), а также своевременно устанавливать и устранять быстротекущие нарушения ВХР. Они не могут использоваться и в системах автоматического управления дозированием реагентов, например, аммиака или фосфатов.

Для комплексного решения проблемы контроля состояния и ведения ВХР в последнее десятилетие широко используются системы химико-технологического мониторинга (СХТМ), основу которых составляют приборы автоматического химического контроля (АХК). Наиболее надежными приборами АХК в промышленной эксплуатации являются кондуктометры и рН-метры, потенциал которых используется, но не в полном объеме. Примером является отсутствие практики измерений удельной электропроводности Н-катионированной пробы котловой воды барабанных котлов на действующих тепловых электрических станциях (ТЭС).

Методы математического моделирования на основе измерений величины рН, удельной электропроводности прямой и Н-катионированной пробы позволяют расширить спектр функциональных возможностей СХТМ, раскрыть приборный потенциал и, следовательно, достаточно эффективно выявлять недостатки и быстротекущие нарушения ВХР.

Разработанная в ИГЭУ обобщенная математическая модель ионных равновесий водных потоков и её алгоритмы расчета, обоснованные теоретически и в условиях лабораторных исследований на модельных растворах, сложны в реализации на тепловых электрических станциях различных параметров по причине особенностей АХК, качественного состава водного теплоносителя, режимам эксплуатации, а также используемых корректирующих реагентов.

Таким образом, контроль состояния, диагностика нарушений и ведение ВХР в рамках СХТМ остается одной из наиболее сложных задач, решение которой следует искать в направлении повышения информативности приборов и систем АХК на базе простых и надежных измерений, а также разработки новых расчетных методик, адаптированных к условиям промышленной эксплуатации.

**Целью работы** является совершенствование методов химического контроля, разработка новых средств и систем химико-технологического мониторинга на базе измерений величины рН, удельной электропроводности исходных и Н-катионированных охлажденных проб водного теплоносителя барабанных котлов ТЭС различных параметров.

Для достижения поставленной цели решаются следующие **задачи**.

1. Разработать и исследовать частные математические модели поведения минеральных примесей водного теплоносителя, полученные из обобщенной математической модели ионных равновесий. Адаптировать математические модели к условиям ВХР барабанных котлов различных параметров с использованием измерений удельной электропроводности и рН питательной и котловой воды для количественного определения нормируемых и диагностических показателей качества водного теплоносителя, а также оценки быстротекущих нарушений ВХР.

2. Составить инженерные методики и алгоритмы косвенного определения хлорида и гидрокарбоната натрия, аммиака – в питательной воде, фосфатов, натрия и щелочности – в котловой воде для условий оперативного контроля.

3. Выполнить промышленные испытания разрабатываемых методик и алгоритмов косвенного определения показателей качества водного теплоносителя на ТЭС с барабанными котлами давлением 13,8 МПа, 9,8 МПа, а также на энергоблоках с парогазовыми установками (ПГУ).

4. Создать опытно-промышленный образец измерительной системы автоматизированного химического контроля состояния ВХР с использованием разработанных методик и алгоритмов косвенного определения концентраций ионных примесей водного теплоносителя для диагностики нарушений ВХР барабанных энергетических котлов.

#### **Научная новизна работы**

1. На базе обобщенной математической модели составлены частные математические модели ионных равновесий водного теплоносителя, адаптированные к условиям промышленной эксплуатации барабанных котлов на современных ТЭС. Определены границы изменения и значения эмпирических коэффициентов частных математических моделей, характеризующих ионные равновесия питательной и котловой воды энергоблоков различных параметров.

2. Разработаны методики и алгоритмы прямого и косвенного определения значений контролируемых и диагностических показателей качества питательной и котловой воды барабанных котлов давлением 13,8 МПа, 9,8 МПа, а также котлов-утилизаторов ПГУ с аммиачно-гидразинным ВХР для использования в системах химико-технологического мониторинга.

3. Разработана методика оценки достоверности измерений удельной электропроводности Н-катионированной пробы ( $\chi_n$ ) котловой воды барабанных котлов ТЭС.

#### **Практическая ценность работы**

1. Предложена структура СХТМ и состав АХК качества водного теплоносителя для получения оперативной информации по нормируемым и диагностическим показателям состояния ВХР барабанных котлов давлением 13,8 МПа.

2. Выполнены промышленные испытания и внедрение опытного образца автоматизированной системы химического контроля состояния ВХР барабанного котла сверхвысокого давления ТП-87 на Ивановской ТЭЦ-3.

3. Разработан программный модуль для контроля состояния, диагностики нарушений и ведения водно-химического режима барабанных котлов с давлением 13,8 МПа, встраиваемый в современные scada-системы.

4. Выполнены промышленные испытания расчетных методик определения количественного состава водного теплоносителя барабанных котлов давлением 9,8 МПа на Ивановской ТЭЦ-2 и котлов-утилизаторов энергоблоков с ПГУ на ГТЭС «Терешково». Проведена диагностика состояния ВХР и оценка состояния ХК, выданы рекомендации для совершенствования режимов эксплуатации.

5. Предложен способ корректировки дозирования раствора фосфата натрия в котловую воду барабанных котлов сверхвысокого давления.

#### **Положения, выносимые на защиту**

1. Частные математические модели ионных равновесий водного теплоносителя барабанных энергетических котлов различных параметров.

2. Методики и алгоритмы прямого и косвенного определения значений контролируемых и диагностических показателей качества питательной и котловой воды для ТЭС с барабанными котлами давлением 13,8 МПа, 9,8 МПа, а также котлов-утилизаторов ПГУ с аммиачно-гидразинным водно-химическим режимом.

3. Результаты лабораторных исследований растворов электролитов, моделирующих качество питательной и котловой воды барабанных котлов давлением до 10 МПа.

4. Результаты промышленных испытаний разработанных методик и алгоритмов на ТЭС с барабанными котлами давлением 13,8 МПа, 9,8 МПа, а также на энергоблоках с ПГУ.

5. Опытно-промышленный образец измерительной системы автоматизированного химического контроля состояния ВХР барабанных котлов давлением 13,8 МПа.

#### **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. 1: «Разработка научных основ методов расчета, выбора и оптимизации параметров, показателей качества и режимов работы агрегатов ...»; п. 2: «Исследование и математическое моделирование процессов, протекающих в агрегатах, системах и общем цикле тепловых электростанций»; п. 3: «Разработка, исследование, совершенствование действующих и освоение новых технологий ... водно-химических режимов...».

**Достоверность и обоснованность** изложенных в диссертации данных и выводов обеспечивается использованием современных информационно-технических средств при решении поставленных задач, применением классических термодинамических методов расчета ионных равновесий, проверкой работоспособности разработанных алгоритмов и методик в условиях лабораторного эксперимента и промышленной эксплуатации, метрологической оценкой измеряемых показателей, а также положительным эффектом от внедрения разработанной автоматизированной системы химического контроля.

#### **Личное участие автора**

Автор принимал активное участие в разработке частных математических моделей ионных равновесий, методик и алгоритмов расчета для использования в условиях промышленной эксплуатации. Автором составлен программный модуль по расчету примесей водного теплоносителя на основе измерений удельной электропроводности и pH, а также предложена методика оценки ресурса предвключенной H-колонки при измерениях удельной электропроводности H-катионированной пробы. При участии автора проведены лабораторные исследования, создан и испытан опытно-промышленный образец системы автоматизированного химического контроля на Ивановской ТЭЦ-3, а также проведены испытания и оценка состояния ВХР на Ивановской ТЭЦ-2, ГТЭС «Терешково».

#### **Апробация работы**

Результаты работы докладывались и обсуждались на XVII Международной научно-технической конференции студентов и аспирантов (Москва, МЭИ (ТУ), 2011), VI Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения» (Казань, КГЭУ 2011), Региональной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Энергия 2012», на конкурсном отборе победителей программы «Участник молодежного научно-инновационного конкурса» (У.М.Н.И.К. 2011), на Всероссийском конкурсе научно-исследовательских работ в области технических наук 2012 (Санкт-Петербург, НИУ СПбПУ), на Всемирном инновационном салоне «Брюсель – Иннова/Эврика 2011».

#### **Публикации**

Материалы диссертации нашли отражение в 19 опубликованных работах, в том числе в 4 статьях в ведущих рецензируемых журналах и изданиях (по списку ВАК).

#### **Объем и структура работы**

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения, списка используемой литературы из 98 наименований и 11 приложений. Количество страниц 206, в том числе рисунков 82, таблиц в тексте 42.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ**

**Во введении** обоснована актуальность темы работы, сформулированы цель и задачи диссертации, научная новизна, практическая значимость по-

лученных результатов, основные положения, выносимые на защиту, обоснована достоверность результатов и дана общая характеристика структуры работы.

**Первая глава** посвящена анализу проблемы водно-химического режима и химконтроля современных барабанных котлов на ТЭС.

Развитие аналитической техники контроля качества воды, пара и конденсата на современных электростанциях с мощными энергоблоками происходит в направлении создания автоматизированных систем, включающих устройства отбора и подготовки проб для анализа, соответственно анализаторов и устройств сбора и обработки информации. Стабильное поддержание заданных оптимальных концентраций ионных примесей водного теплоносителя может быть обеспечено при условии непрерывного автоматического дозирования корректирующих реагентов.

Отмечено, что указанное выше подтверждается в решениях Симпозиума международной ассоциации по свойствам воды и пара – IAWPS (Чехия, Пльзень, сентябрь 2011 г.), где основным направлением развития признан автоматический химический контроль качества водного теплоносителя с разработкой дополнительных функций. Такое направление более 20 лет разрабатывается на кафедре ХХТЭ ИГЭУ под руководством д-ра техн. наук, профессора Б.М. Ларина. Эти работы являются развитием разработок ОАО «ВТИ» по созданию систем АХК 70-х годов (Л.М. Живилова) и более поздних работ МЭИ (В.Н. Воронов и др.).

В завершение раздела представлена последняя разработка ИГЭУ – обобщенная математическая модель (ММ) водных потоков. Обозначены основные принципы построения, особенности решения, недостатки и преимущества ММ.

С учетом результатов проведенного анализа опубликованных данных сформулирована цель и задачи работы, основой которых является количественное определение ряда основных параметров качества теплоносителя на базе измерений удельной электропроводности и рН.

**Во второй главе** приводится обоснование методики проведения исследований и разработка расчетного метода по определению ионного состава водного теплоносителя.

Объем химического и теплотехнического контроля для СХТМ в пусковых режимах определяется для каждого конкретного объекта с учетом особенностей тепловой схемы, режимных параметров, способа подготовки добавочной воды и динамики технологического объекта. Для исследований на Ивановской ТЭЦ-3 была разработана структурная схема автоматического химконтроля за ВХР (рис. 1). Примененные технические средства позволят обеспечить возможность контроля рабочего состояния барабанного котла и в дальнейшем могут использоваться для автоматизации управления рабочими процессами.

Разработанная в ИГЭУ общая математическая модель ионных равновесий для питательной и котловой воды, описанная в первой главе, мало

пригодна для условий оперативной оценки состояния водно-химического режима, что в масштабе промышленной эксплуатации не приемлемо.

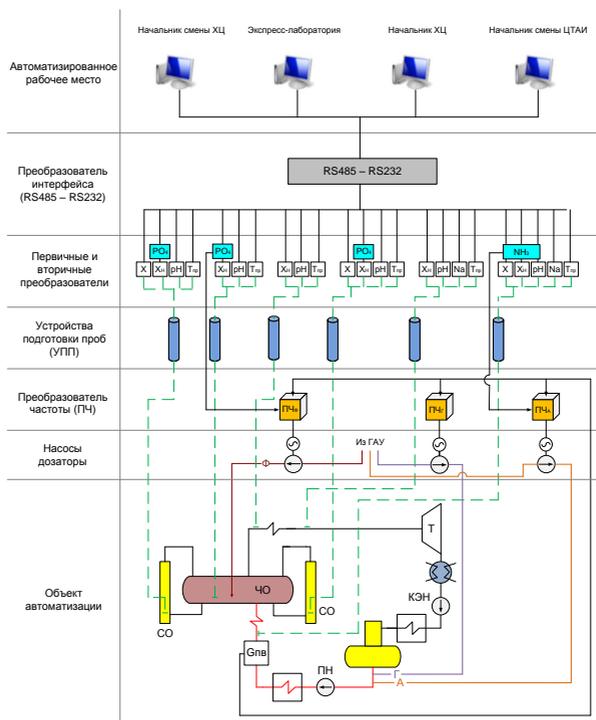


Рис. 1. Структурная схема автоматического химконтроля ВХР и управление дозированием корректирующих реагентов

В данной работе предложены частные математические модели, адаптированные к ВХР барабанных котлов различных параметров, в том числе для котлов давлением 13,8 МПа.

Ионные равновесия в котловой воде солевого отсека описываются уравнениями (1)÷(5). Для их решения нами были введены несколько параметров, таких как щелочной коэффициент ( $b$ ), коэффициент концентрирования ( $K_k$ ), отношение концентрации гидрокарбонатов и хлоридов в питательной воде ( $n$ ).

$$[\text{Na}^+]_{\text{co}} = [\text{OH}^-]_{\text{co}} + 2 \cdot [\text{HPO}_4^{2-}]_{\text{co}} + [\text{Cl}^-]_{\text{co}} + \left( 2 + 10^{-\frac{\text{pHco}}{K_{\text{H}^2\text{CO}_3}} \right) \cdot [\text{CO}_3^{2-}]_{\text{co}}; \quad (1)$$

$$[\text{OH}^-]_{\text{co}} = b \cdot [\text{HPO}_4^{2-}]_{\text{co}} + \left( 10^{-\frac{\text{pHco}}{K_{\text{H}^2\text{CO}_3}} \right) \cdot [\text{CO}_3^{2-}]_{\text{co}}; \quad (2)$$

$$1000 \cdot \chi_{\text{co}} = \lambda_{\text{Na}^+} \cdot [\text{Na}^+]_{\text{co}} + \lambda_{\text{OH}^-} \cdot [\text{OH}^-]_{\text{co}} + 2 \cdot \lambda_{\text{HPO}_4^{2-}} \cdot [\text{HPO}_4^{2-}]_{\text{co}} + \lambda_{\text{Cl}^-} \times \\ \times [\text{Cl}^-]_{\text{co}} + \left( 2 \cdot \lambda_{\text{CO}_3^{2-}} + \lambda_{\text{HCO}_3^-} \cdot 10^{-\frac{\text{pHco}}{K_{\text{H}^2\text{CO}_3}} \right) \cdot [\text{CO}_3^{2-}]_{\text{co}}; \quad (3)$$

$$1000 \cdot \chi_{\text{H}_2\text{CO}_3} = (\lambda_{\text{H}^+} + \lambda_{\text{Cl}^-}) \cdot [\text{Cl}^-]_{\text{co}} + (\lambda_{\text{H}^+} + \lambda_{\text{H}_2\text{PO}_4^-}) \cdot [\text{H}_2\text{PO}_4^-]_{\text{co}}; \quad (4)$$

$$\left(1 + 10^{-\frac{\text{pH}_{\text{co}}}{K_{\text{H}_2\text{CO}_3}^{\text{HCO}_3^-}}}\right) \cdot [\text{CO}_3^{2-}]_{\text{co}} = [\text{Cl}^-]_{\text{co}} \cdot \frac{[\text{HCO}_3^-]_{\text{пв}}}{2 \cdot [\text{Cl}^-]_{\text{пв}}}, \quad (5)$$

где,  $\chi_{\text{co}}$ ,  $\chi_{\text{H}}$ ,  $\chi_{\text{co}}$  – удельная электропроводность прямой охлажденной и Н-катионированной пробы,  $\text{Ом}^{-1} \cdot \text{см}^{-1}$  ( $\text{См}/\text{см}$ );  $b$  – щелочной коэффициент, зависящий от присутствия в добавляемом в котел растворе тринатрий фосфата  $\text{NaOH}$  ( $b = 1,0 \div 5$ ) или  $\text{Na}_2\text{HPO}_4$  ( $b = 0,5 \div 1,0$ ). При их отсутствии  $b=1$  (режим чисто фосфатной щелочности).

Числовое значение коэффициента  $b$  может быть определено в первом приближении по измеренному значению величины  $\text{pH}_{\text{co}}$  в виде

$$b = \frac{10^{(\text{pH}_{\text{co}} - \gamma) - 14}}{[\text{HPO}_4^{2-}]_{\text{co}}}. \quad (6)$$

Более точным следует признать итерационное уточнение значения концентрации  $[\text{OH}^-]_{\text{co}}$  при заданном увеличении коэффициента  $b$  в уравнении (2).

Система уравнений (1)–(5) может быть решена при измерениях:

- в питательной воде:  $\chi_{\text{пв}}$ ,  $\chi_{\text{H}}$ ,  $\text{pH}_{\text{пв}}$  с последующим расчетом  $[\text{Cl}^-]_{\text{пв}}$  и  $[\text{HCO}_3^-]_{\text{пв}}$ :

$$[\text{Cl}^-]_{\text{пв}} = 1000 \cdot \frac{\chi_{\text{H,пв}}}{(\lambda_{\text{H}^+} + \lambda_{\text{Cl}^-}) \cdot (1+n)^{-n} \cdot (\lambda_{\text{Cl}^-} - \lambda_{\text{HCO}_3^-})}; \quad (7)$$

$$[\text{HCO}_3^-]_{\text{пв}} = (0,45 + 2,34 \cdot \chi_{\text{H,пв}}) \cdot n \cdot \frac{[\text{Cl}^-]_{\text{пв}}}{0,45 + 10^{-\text{pH}_{\text{пв}} + 6}}, \quad (8)$$

где,  $n$  – отношение концентрации гидрокарбонатов и хлоридов в охлажденной Н-катионированной пробе питательной воды;  $n=0,1 \div 1,0$  наиболее вероятный диапазон изменения  $n$ ;

- в котловой воде солевого отсека:  $\chi_{\text{co}}$ ,  $\chi_{\text{H}}$ ,  $\chi_{\text{co}}$ ,  $\text{pH}_{\text{co}}$ .

Задаваясь коэффициентом концентрирования примесей питательной воды до концентрации в солевом отсеке барабана котла ( $K_{\text{к}}$ ) можно записать выражение

$$[\text{Cl}^-]_{\text{co}} = K_{\text{к}} \cdot [\text{Cl}^-]_{\text{пв}}, \quad (9)$$

где  $K_{\text{к}}=5 \div 15$  – эмпирические значения, полученные при анализе качества водного теплоносителя котлов давлением 13,8 МПа (Печорская ГРЭС, ТЭЦ-26 ОАО «Мосэнерго», Ивановская ТЭЦ-3 и др.).

В таком случае уравнения (1)–(5) содержат десять неизвестных величин. Из них измеряются  $\chi_{\text{co}}$ ,  $\chi_{\text{H}}$ ,  $\chi_{\text{co}}$ ,  $\text{pH}_{\text{co}}$ . Концентрации гидрокарбонатов и хлоридов в питательной воде  $[\text{HCO}_3^-]_{\text{пв}}$ ,  $[\text{Cl}^-]_{\text{пв}}$  – определяются из расчета ионных равновесий в питательной воде и могут считаться определенными.

Для практических целей установлена величина ошибки расчетного определения концентрации фосфатов при отклонении от средних действительных значений коэффициента концентрирования примесей питательной

воды до концентрации в солевом отсеке барабана котла ( $K_k$ ) и значений отношения концентрации гидрокарбонатов и хлоридов в охлажденной Н-катионированной пробе питательной воды ( $n$ ) в условиях промышленной эксплуатации. Такую оценку можно выполнить расчетным путем при помощи алгоритма косвенного определения концентраций ионных примесей питательной и котловой воды барабанных котлов СВД, изменяя значения параметров в реально возможном диапазоне.

Как видно из рис. 2, отклонение значений концентрации фосфатов при средних значениях  $n=0,55$  и  $K_k=10$  от минимального расчетного значения концентрации фосфатов составляет 6,4%, от максимального расчетного значения – 3,3%. При значениях коэффициента концентрирования в пределах  $K_k=8\div 12$ , соответствующих нормальной работе котельного агрегата, максимальное отклонение составляет 3,8%.

Ввиду незначительного влияния параметров  $n$  и  $K_k$  на результат расчета в дальнейшем будет использоваться среднее вероятное значение коэффициента концентрирования  $K_k = 10$  и отношение концентрации гидрокарбонатов и суммарной концентрации анионов сильных кислот в питательной воде  $n = 0,55$ .

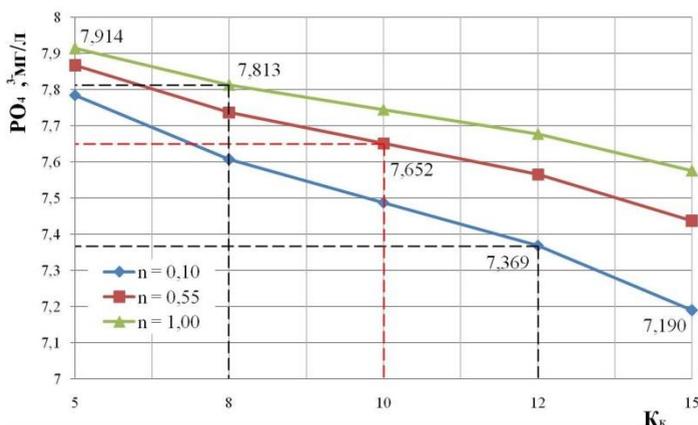


Рис. 2. Оценка влияния параметров  $n$  и  $K_k$  на результат расчета концентрации фосфатов в котловой воде солевого отсека

Возможны несколько вариантов решения поставленной задачи в рамках систем уравнений (1)–(5) при различном количестве исходных данных.

Например, при измерениях удельной электропроводности Н-катионированных проб ( $\chi_{н}$ ) питательной воды и котловой воды солевого отсека рассчитывается только концентрация фосфатов в котловой воде солевого отсека. При увеличении количества измеряемых показателей, увеличивается число рассчитываемых концентраций.

**Третья глава** посвящена разработке и исследованию автоматизированной системы ХК качества водного теплоносителя барабанных котлов давлением 13,8 МПа. В ходе предварительных исследований, включавших в себя анализ состояния ВХР и ХК за качеством водного теплоносителя котла

№3 Ивановской ТЭЦ-3. Был рекомендован максимальный объем автоматического химконтроля за качеством теплоносителя энергетического котла для получения оперативной информации по нормируемым и диагностическим показателям в рамках СХТМ состояния ВХР.

Расчетом по математической модели и химическим анализом определяются показатели качества среды:

- питательная вода:  $\text{NH}_3$ , ( $\text{Ж}_0 + \text{Na}^+$ ),  $\text{Cl}^-$ ;
- перегретый пар:  $\text{NH}_3$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ;
- котловая вода (солевой отсек): солесодержание, концентрация фосфатов  $[\text{PO}_4^{3-}]$ ;
- котловая вода (чистый отсек): солесодержание, концентрация фосфатов  $[\text{PO}_4^{3-}]$ .

Расчетный алгоритм (рис. 3) реализован на базе методики, описанной во второй главе.

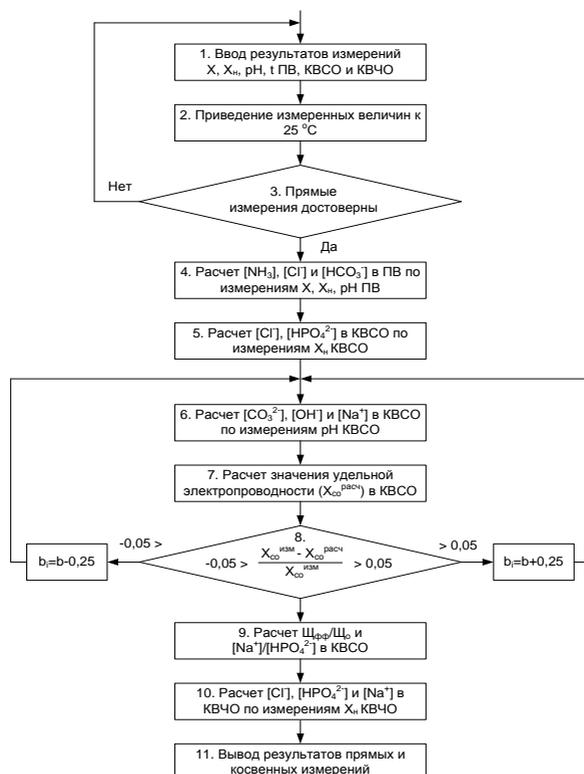


Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчета концентрации ионных примесей в котловой воде солевого и чистого отсеков барабанных котлов давлением 13,8 МПа

Исходными данными для расчета концентрации ионных примесей питательной и котловой воды являются удельная электропроводность прямой пробы питательной воды и котловой воды солевого отсека, удельная элек-

тропроводность Н-катионированной пробы питательной воды и котловой воды солевого и чистого отсека, рН питательной воды и котловой воды солевого отсека, а также температура пробы соответствующих потоков.

Принятый алгоритм обработки результатов измерений позволяет отсечь случайные ошибки измерений отдельных параметров, связанные с нарушением условий подготовки пробы или достоверности измерительного канала, диагностировать рабочее состояние катионита, загруженного в фильтровальную колонку и получить расчётные значения ионных примесей питательной и котловой воды.

Для обработки и визуализации данных, получаемых с приборной измерительной системы, составлен программный модуль, встраиваемый в scada-систему, обработки, отображения и архивирования информации об объекте мониторинга или управления. Диалоговое окно данной программы представлена на рис. 4.

Аналитические данные состояния ВХР барабанного котла ТП-87 (ст. №3) показаны на диаграмме состояния фосфатных водно-химических режимов (рис. 5).

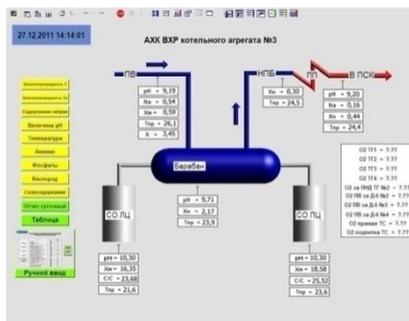
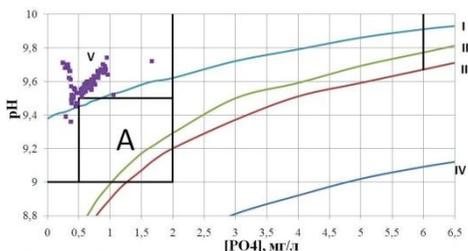


Рис. 4. Диалоговое окно автоматизированной системы химического контроля за водно-химическим режимом котельного агрегата №3 Ивановской ТЭЦ-3



А - зона равновесного фосфатного водно-химического режима соответствующего действующим нормам ПТЭ  
 I - зависимость рН котловой воды от содержания фосфатов при избытке NaOH 1 мг/л  
 II - зависимость рН котловой воды от содержания фосфатов при соотношении Na/PO4 = 5,0  
 III - зависимость рН котловой воды от содержания фосфатов при соотношении Na/PO4 = 2,8  
 IV - зависимость рН котловой воды от содержания фосфатов при соотношении Na/PO4 = 2,2  
 V - зависимость рН котловой воды от содержания фосфатов в барабане котла №3 ИТЭЦ-3

Рис. 5. Диаграмма состояния фосфатно-водно-химического режима барабанного котла ТП-87 Ивановской ТЭЦ-3

Рекомендованная правилами технической эксплуатации (ПТЭ) зона ведения водно-химического режима барабанных котлов давлением 13,8 МПа соответствует прямоугольнику – зона «А» (рис. 5). Точками представлены данные автоматического контроля в период с октября по ноябрь 2010 года. Как видно из рис. 5, значения рН выходят за пределы рекомендуемой зоны, что может отвечать избыточной дозировке NaOH в раствор фосфата натрия.

Анализ опытно-промышленных данных за длительный период работы автоматизированной системы химического контроля показал, что рассчитываемые значения концентраций фосфатов в котловой воде и концентрации аммиака в питательной воде в основном коррелируют с данными, полученными химической лабораторией Ивановской ТЭЦ-3, что подтверждается графиками на рис. 6, 7.

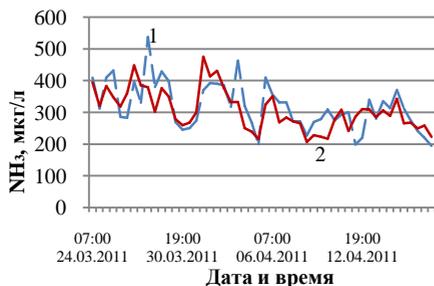


Рис. 6. График изменения концентрации аммиака в питательной воде барабана котла с 24.03.11 по 17.04.11:

1 – аналитические данные; 2 – расчетные данные

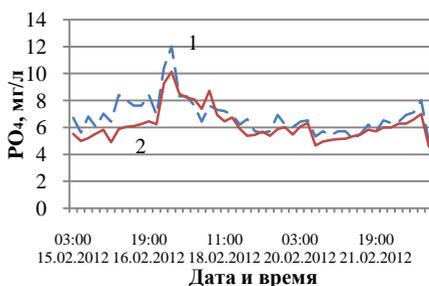


Рис. 7. График изменения концентрации фосфатов в котловой воде солевого отсека барабана котла с 15.02.12 по 22.02.12:

1 – аналитические данные; 2 – расчетные данные

Расхождение между значениями концентраций ионных примесей, полученных с помощью расчетной методики и значений, полученных путем химического анализа обусловлено:

- 1) погрешностью прямых измерений удельной электропроводности и величины рН и погрешностью косвенного определения концентраций ионных примесей;
- 2) погрешностью химического анализа.

К примеру, расхождение между аналитическими данными и расчетными значениями концентрации фосфатов в чистом отсеке (рис. 7, 16.02.12) связано, скорее всего, с увеличением случайной ошибки химического анализа. Данное предположение основано на том, что концентрация фосфатов косвенно зависит от значений удельной электропроводности и рН. В момент резкого возрастания концентрации фосфатов (по данным химического анализа) изменение значений  $\chi$ ,  $\chi_{\text{н}}$  и рН не наблюдается.

**В четвертой главе** описываются разработка и исследования частных математических моделей поведения минеральных примесей водного теплоносителя, адаптированных к условиям ВХР барабанных котлов до 10 МПа.

Были проведены лабораторные опыты с растворами, моделирующими качество котловой воды барабанных котлов с давлением 9,8 МПа.

Показано, что измерения удельной электропроводности как прямой, так и Н-катионированной проб котловых вод барабанных котлов с давлением 9,8 МПа может использоваться для автоматического контроля содержания котловой воды с количественным определением концентраций  $\text{Na}^+$  и  $\text{Cl}^-$ . Однако оперативная оценка концентрации фосфатов в котловой воде с ошибкой в пределах 10% вряд ли возможна виду малой концентрации  $\text{PO}_4^{3-}$  по отношению к концентрации  $\text{NaCl}$ . Промышленные испытания методики косвенного определения качества водного теплоносителя барабанных котлов с давлением 9,8 МПа, проведенные на Ивановской ТЭЦ-2, подтвердили все указанные предположения.

Другим объектом исследований в рамках данного раздела являлся водно-химический режим котлов-утилизаторов энергоблоков с ПГУ. В со-

ответствии с требованиями к качеству питательной и добавочной воды качество питательной воды котлов-утилизаторов ПГУ отвечает качеству питательной воды барабанных энергетических котлов с давлением 13,8 МПа. При использовании гидразин-аммиачного водно-химического режима контроль качества ионных примесей питательной воды может строиться на основе измерений  $\chi$ ,  $\chi_n$ , pH подобно тому, как разработано для питательной воды котлов с давлением 13,8 МПа.

Расчет концентраций ионных примесей котловой воды контуров низкого (КНД) и высокого (КВД) давления энергоблока ПГУ может строиться на базе математической модели ионных равновесий котловой воды барабанных котлов с давлением 13,8 МПа. В данном случае – для энергоблока ГТЭС «Терешково» (г. Москва) – математическая модель была видоизменена с учетом неполноты выноса аммиака в пар и отсутствия фосфатов, однако с добавлением в котловую воду NaOH.

В условиях измерения в питательной воде значений  $\chi$ ,  $\chi_n$ , pH можно считать известными концентрации  $[\text{NH}_3]_{\text{пв}}$ ,  $[\text{Cl}^-]_{\text{пв}}$ ,  $[\text{HCO}_3^-]_{\text{пв}}$ . Тогда, итоговая система уравнений ионных равновесий котловой воды котла-утилизатора блока ПГУ может быть записана в следующем виде:

$$1000 \cdot \chi_n = (\lambda_{\text{H}^+} + \lambda_{\text{Cl}^-}) \cdot [\text{Cl}^-]; \quad (10)$$

$$K_k = [\text{Cl}^-]/[\text{Cl}^-]_{\text{пв}}; \quad (11)$$

$$(1 + K_a) \cdot [\text{CO}_3^{2-}] = K_k \cdot 0,5 \cdot (1 + q) \cdot [\text{HCO}_3^-]_{\text{пв}}; \quad (12)$$

$$[\text{NH}_4^+] + [\text{Na}^+] = 10^{p\text{H}-14} + [\text{Cl}^-] + (2 + K_a) \cdot [\text{CO}_3^{2-}]; \quad (13)$$

$$1000 \cdot \chi = \lambda_{\text{NH}_4^+} \cdot [\text{NH}_4^+] + \lambda_{\text{Na}^+} \cdot [\text{Na}^+] + \lambda_{\text{OH}^-} \cdot 10^{p\text{H}-14} + \lambda_{\text{Cl}^-} \times \\ \times [\text{Cl}^-] + (2 \cdot \lambda_{\text{CO}_3^{2-}} + \lambda_{\text{HCO}_3^-} \cdot K_a) \cdot [\text{CO}_3^{2-}], \quad (14)$$

где  $K_a = \frac{10^{-p\text{H}}}{K_{\text{II}, \text{H}_2\text{CO}_3}}$ ; q – доля гидрокарбонатов питательной воды, не подверженная термолизу в котловой воде ( $2\text{HCO}_3^- \leftrightarrow \text{CO}_2 \uparrow + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_3^{2-}$ ), тогда  $0,5 \cdot (1-q)$  – доля гидрокарбонатов, ушедших в пар в виде  $\text{CO}_2$  и то же, перешедших в форму  $\text{CO}_3^{2-}$ ;  $[\text{OH}^-] = 10^{p\text{H}-14}$  – концентрация гидроксильных ионов по измерению pH котловой воды.

Дополнительными можно считать уравнения соотношения карбонатов и гидрокарбонатов в котловой воде:

$$[\text{CO}_3^{2-}] = 0,48 \cdot 10^{p\text{H}-10} \cdot [\text{HCO}_3^-] \quad (15)$$

и уравнение соотношения концентраций аммонийных ионов в котловой воде (моль/л) и суммарной концентрации аммиака ( $[\text{NH}_3]_{\text{пв}}$ ) в питательной воде, мкг/л:

$$[\text{NH}_4^+] = \frac{1,035 \cdot 10^{-7} \cdot p \cdot [\text{NH}_3]_{\text{пв}}}{(1,76 + 10^{p\text{H}-9})}, \quad (16)$$

где  $p = 0,0 \div 0,2$  – доля концентрации аммиака питательной воды, оставшаяся в котловой воде.

Порядок решения системы уравнений (10)÷(16) при измерении показателей качества котловой и питательной воды изображен на рис. 8 в виде блок-схемы.

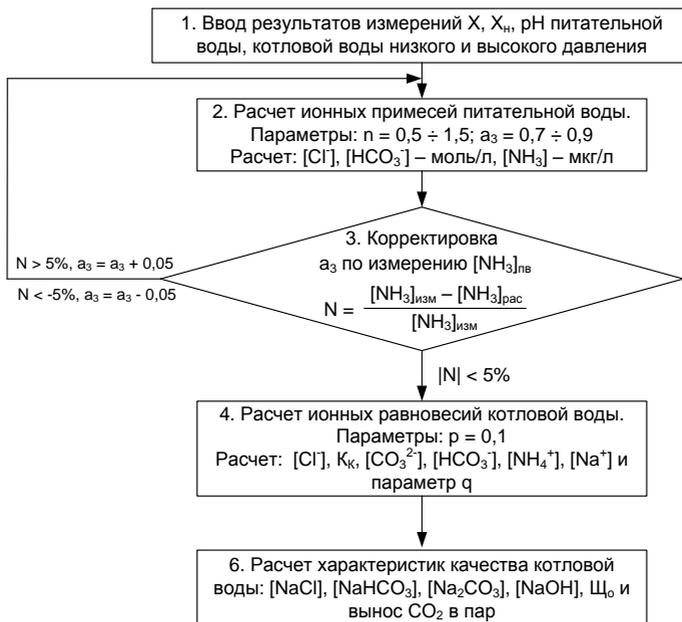


Рис. 8. Блок-схема алгоритма расчета концентраций ионных примесей питательной и котловой воды контуров низкого и высокого давления энергоблоков ПГУ

В связи с периодическим превышением рекомендуемых норм по отдельным показателям в октябре – декабре 2012 года сотрудниками кафедры ХХТЭ ИГЭУ проведено обследование энергоблока ПГУ ГТЭС «Терешково» (г. Москва). Анализ состояния химического контроля и водно-химического режима энергоблока ГТЭС «Терешково» с использованием расчетных методик выявил ряд нарушений.

На рис. 9, 10 приведены результаты расчетов ионных равновесий и концентраций примесей в питательной воде энергоблока ПГУ-220 ГТЭС «Терешково» в сравнении с результатами расчета показателей качества водного теплоносителя Ивановской ТЭЦ-3. Из среднемесячных данных видно, что значение удельной электропроводности ( $\chi$ ) прямой пробы питательной воды Ивановской ТЭЦ-3 несколько выше значений  $\chi$  по данным суточных ведомостей ГТЭС «Терешково» (3,83 мкСм/см и 3,42 мкСм/см). Аналогичная картина наблюдается и по значениям удельной электропроводности Н-катионированной пробы (0,33 и 0,3 мкСм/см). Однако, при одинаково малой концентрации хлоридов (около 0,58 и 0,52 ммоль/л рис. 9) концентрация гидрокарбонатов, представляющих форму углекислоты,

имеет весьма существенные различия: около 22 мкг-экв/л для ГТЭС «Терешково» и малые значения концентрации гидрокарбонатов в питательной воде Ивановской ТЭЦ-3 – 0,78 мкг-экв/л. Такая большая концентрация, как в питательной воде блока ПГУ ГТЭС «Терешково», недопустима даже для связанной аммиаком углекислоты, что приводит к выходу за норму значений  $\chi_n$  пара.

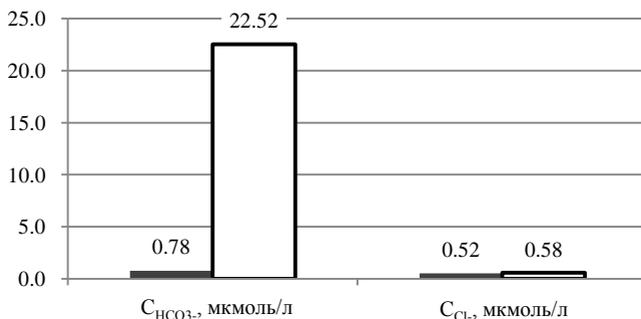


Рис. 9. Сравнительная диаграмма среднемесячных значений концентраций хлоридов и гидрокарбонатов в питательной воде:

- - расчетные данные по Ивановской ТЭЦ-3;
- - расчетные данные по ГТЭС «Терешково»

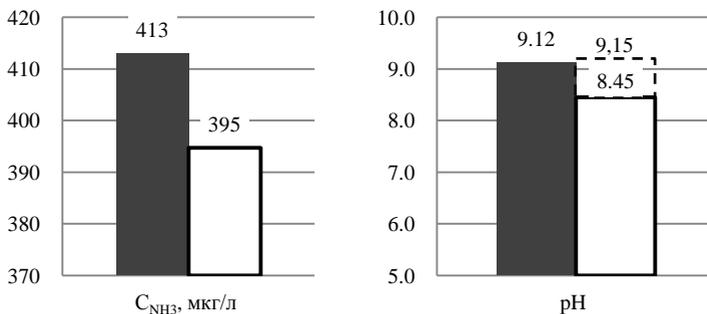


Рис. 10. Сравнительная диаграмма среднемесячных расчетных значений концентраций аммиака (слева) и измеренной величины pH (справа) питательной воды:

- - данные по Ивановской ТЭЦ-3;
- - данные по ГТЭС «Терешково»;
- ▤ - данные химической лаборатории ГТЭС «Терешково»

Сравнение результатов измерений pH питательной воды энергоблока ГТЭС «Терешково», выполненных pH-метрами с проточной потенциометрической ячейкой и Deltoson pH, показывает завышение значений pH по измерениям Deltoson pH. Данный факт связан с присутствием угольной кислоты в концентрациях (рис. 10), существенно больших (более чем в 10 раз) по сравнению с концентрацией NaCl в анализируемой пробе, что выводит анализатор Deltoson pH за допустимые пределы использования, а в питательном тракте может вызывать развитие коррозионных процессов.

**Пятая глава** посвящена оценке результатов исследований состояния ВХР паровых котлов различных параметров, а также особенностям реализации системы АХК на барабанном котле (ст. №3) Ивановской ТЭЦ-3.

Одной из основных особенностей реализации системы АХК является способ контроля срабатывания ионита в Н-форме, загруженного в фильтровальную колонку при измерениях удельной электропроводности  $\chi_n$  котловой воды барабанных котлов СВД. Предложенные критерии срабатывания были проверены в условиях непрерывного измерения удельной электропроводности Н-катионированной пробы котловой воды на Ивановской ТЭЦ-3.

Также в рамках работы над созданием системы был предложен способ автоматического регулирования дозировки фосфатов в котловую воду барабанных котлов с давлением 13,8 МПа, основанный на измерении удельной электропроводности охлажденных Н-катионированной проб. Суть способа заключается в том, что при автоматической дозировке фосфатов в котловую воду основным сигналом для задания расхода является величина продувки, либо расход питательной воды, а в качестве корректирующего сигнала предложена концентрация фосфатов в котловой воде, рассчитанная с использованием методики косвенного определения концентраций ионных примесей водного теплоносителя.

Результаты измерений приборов АХК и косвенного определения концентраций ионных примесей были оценены, применяя расчетные методики, приведенные в нормативной документации по метрологии измерений.

В частности, были определены погрешности и доверительные интервалы прямых измерений величины рН, удельной электропроводности прямой и Н-катионированной пробы, результаты представлены в таблице.

Расчет истинных значений

Показатели	$\chi_n$ , мкСм/см	$\chi$ , мкСм/см	рН
Среднеарифметическое	28,810	59,581	10,272
S ( $\bar{a}$ ) <sub>ср</sub> (среднеквадратичное отклонение)	0,005	0,024	0,001
$\Delta a$ (погрешность измерений)	0,154	0,349	0,104
Доверительный интервал (P=0,95)	[28,656; 28,964]	[59,232; 59,930]	[10,168; 10,376]

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Разработаны и исследованы частные математические модели поведения минеральных примесей водного теплоносителя, полученные из обобщенной математической модели ионных равновесий. Проведена адаптация частных математических моделей к условиям ведения ВХР барабанных котлов с давлением 13,8 МПа, 9,8 МПа и котлов-утилизаторов энергоблоков ПГУ с использованием измерений удельной электропроводности и рН питательной и котловой воды для количественного определения нормируемых и диагностических показателей качества водного теплоносителя, а также оценки быстротекущих нарушений ВХР. Путем анализа эксплуата-

ционных данных различных ТЭС определены границы изменения эмпирических коэффициентов, введенных для решения математических моделей, выявлено их влияние на результаты расчета.

2. Разработаны инженерные методики и алгоритмы прямого и косвенного определения концентраций аммиака, натрия, хлоридов, гидрокарбонатов в питательной воде, а также концентраций фосфатов, гидроксидионов, натрия, хлоридов, гидрокарбонатов в котловой воде барабанных котлов различных параметров, в том числе котлов-утилизаторов ПГУ с аммиачно-гидразинным ВХР.

3. Предложена структура и состав приборов АХК для создания опытно-промышленного образца измерительной системы автоматизированного химического контроля состояния ВХР с использованием разработанных методик и алгоритмов косвенного определения концентраций ионных примесей питательной и котловой воды. Для контроля состояния, диагностики нарушений, ведения водно-химического режима барабанных котлов с давлением 13,8 МПа Ивановской ТЭЦ-3 разработан программный модуль, встраиваемый в современные scada-системы.

4. Выполнены промышленные испытания автоматизированной системы химико-технологического мониторинга водно-химического режима барабанного котла ТП-87 на Ивановской ТЭЦ-3. Собранные данные в процессе показали хорошую сходимостью рассчитываемых показателей качества со значениями, полученными в условиях лабораторного химического контроля. Определено, что погрешность косвенного определения нормируемых и диагностических показателей не превышает 10 %, что можно считать приемлемым для практических целей автоматического химического контроля.

5. Для реализации методик косвенного определения ионных примесей водного теплоносителя разработан способ оценки достоверности измерения удельной электропроводности Н-катионированной пробы котловой воды барабанных котлов ТЭС. Предложены и проверены в условиях промышленной эксплуатации критерии срабатывания катионита в Н-форме.

6. Предложен способ автоматического регулирования дозировки фосфатов в котловую воду барабанных котлов с давлением 13,8 МПа, основанный на измерении удельной электропроводности охлажденных Н-катионированных проб водного теплоносителя.

7. Выполнены промышленные испытания расчетных методик определения количественного состава водного теплоносителя барабанных котлов давлением 9,8 МПа на Ивановской ТЭЦ-2 и котлов-утилизаторов энергоблоков с ПГУ на ГТЭС «Терешково». Проведенное обследование состояния химконтроля и ВХР энергоблока ПГУ ГТЭС «Терешково» с использованием разработанной с участием автора методик расчета позволило выявить отклонения в достоверности автоматических измерений ХК, в частности, измерений величины рН анализатором «FAM Deltacon рН» и нарушения ведения ВХР. Были выданы рекомендации и предложения по нормализации состояния ВХР и ХК.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Научные статьи, опубликованные в изданиях по списку ВАК*

1. **Колегов, А.В.** Внедрение системы автоматического химического контроля за водно-химическим режимом ТЭС / А.В. Колегов, Б.М. Ларин, А.Б. Ларин, Е.В. Козюлина // Вестник ИГЭУ. – № 4 – 2011. – С. 15-19.
2. **Колегов, А.В.** Расчет показателей качества водного теплоносителя и оценка состояния ВХР барабанных котлов / А.В. Колегов, Б.М. Ларин, А.Б. Ларин, Е.В. Козюлина. // Теплоэнергетика. – № 7 – 2012. – С. 10-14.
3. **Колегов, А.В.** Обоснование использования эмпирических параметров и алгоритма расчета математической модели котловой воды / А.В. Колегов, А.Б. Ларин // Вестник ИГЭУ. – № 4 – 2012. – С. 5-8.
4. **Колегов, А.В.** Анализ результатов автоматического химического контроля качества водного теплоносителя барабанного котла Ивановской ТЭЦ-3 / А.В. Колегов, А.Б. Ларин // Теплоэнергетика. – № 10 – 2012. – С. 65-70.

### *Публикации в других изданиях*

5. **Колегов, А.В.** Новая система автоматического химконтроля водного теплоносителя барабанного котла СВД на базе Ивановской ТЭЦ-3 / А.В. Колегов, Б.М. Ларин, А.Б. Ларин, Е.В. Козюлина и др. // Материалы V Всерос. науч.-практ. конф. «Повышение эффективности энергетического оборудования». – Иваново: ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – 2010, – С. 184-189.
6. **Колегов, А.В.** Энергосберегающая технология: система автоматического химконтроля водного теплоносителя барабанного котла СВД / А.В. Колегов, А.Б. Ларин // Сборник научно-исследовательских работ финалистов конкурса аспирантов и молодых ученых в области энергосбережения в промышленности. – Новочеркасск: Лик. – 2010, – с. 36-40.
7. **Колегов, А.В.** Разработка и испытание новой системы автоматического химконтроля на Ивановской ТЭЦ-3 / А.В. Колегов, А.Б. Ларин // Материалы XVII Междунар. науч. – техн. конф. студ. и асп. «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – М.: МЭИ. – 2011, Т.3. – С.163-164.
8. **Колегов, А.В.** Автоматизированная система контроля и обработки показателей качества теплоносителя барабанных котлов СВД / А.В. Колегов, А.Б. Ларин // Материалы VI Междунар. молодежной науч. конф. «Тинчуринские чтения». – Казань: КГЭУ. – Т.2. – 2011. – С. 138-139.
9. **Колегов, А.В.** Результаты испытаний системы автоматического химконтроля на Ивановской ТЭЦ-3 / А.В. Колегов, А.Б. Ларин // Материалы региональной науч.-тех. конф. студ и асп. «Энергия 2011». – Иваново: ИГЭУ. – 2011. – Т.1. – С. 72-73.
10. **Колегов, А.В.** Опытная эксплуатация новой системы химико-технологического мониторинга котла №3 Ивановской ТЭЦ-3 / А.В. Колегов, А.Б. Ларин, Е.В. Козюлина // Материалы XVI Междунар. научн.-техн. конф. «Бенардосовские чтения». – Иваново: ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – Т.2. – 2011. – С. 107-109.
11. **Колегов, А.В.** Способ определения концентрации фосфатов в котловой воде по измерению удельной электропроводности и рН / А.В. Колегов, А.Б. Ларин, Е.В. Козюлина // Материалы VI Междунар. науч.-практ. конф. «Повышение эффективности энергетического оборудования». – Иваново: ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – 2011. – С. 305-310.
12. **Колегов, А.В.** Разработка опытно-промышленной СХТМ за ВХР энергетического Котла №3 Ивановской ТЭЦ-3 / А.В. Колегов, А.Б. Ларин, Е.В. Козюлина // Сборник отчетов «Инновационные проекты молодых ученых». – Иваново: ГОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – 2011. – С. 37-42.
13. **Колегов, А.В.** Промышленное опробование системы автоматического химического контроля с использованием измерений удельной электропроводности Н-катионированной

пробы котловой воды солевого отсека / А.В. Колегов, А.Б. Ларин // Материалы XVIII Междунар. науч. – техн. конф. студ. и асп. «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика». – М.: МЭИ. – 2012. – Т.3. – С.149.

14. **Колегов, А.В.** Определение солевых примесей в котловой воде по измерению электропроводности и pH / А.В. Колегов, Б.М. Ларин, А.Б. Ларин // Новое в российской электроэнергетике. – №4. – 2012. – С. 33-40.

15. **Колегов, А.В.** Критерии истощения ионита при измерениях удельной электропроводности Н-катионированной пробы котловой воды солевых отсеков котлов СВД / А.В. Колегов // Материалы VII Междунар. молодежной науч. конф. «Тинчуринские чтения». – Казань: КГЭУ. – Т.2. – 2012. – С. 140-141.

16. **Колегов, А.В.** Исследование ВХР барабанных котлов ИвТЭЦ-2 / А.В. Колегов, А.Б. Ларин // Материалы региональной науч.-техн. конф. студ. и асп. «Энергия 2012». – Иваново: ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина». – 2012. – Т.1. – С. 98-99.

17. **Колегов, А.В.** Автоматизация контроля и дозирования фосфатов в барабан котла с давлением 13,8 МПа на примере Ивановской ТЭЦ-3 / А.В. Колегов, А.Б. Ларин // Материалы специализированной науч.-практ. конф. молодых специалистов «Современные технологии в энергетике – основа повышения надежности, эффективности и безопасности оборудования ТЭС». – М.: ОАО «ВТИ». – 2012. – С. 397-402.

18. **Колегов, А.В.** Совершенствование химконтроля за водным режимом энергоблока ТЭС с ПГУ / А.В. Колегов, А.Б. Ларин, Н.В. Еремин // Материалы VIII Междунар. молодежной науч. конф. «Тинчуринские чтения». – Казань: КГЭУ. – Т.2 – 2013. – С. 97-98.

19. **Колегов, А.В.** Анализ состояния водно-химического режима энергоблока ПГУ-210 / А.В. Колегов, А.Б. Ларин, А.Я. Сорокина // Материалы VIII Международной молодежной науч. конф. «Тинчуринские чтения». – Казань: КГЭУ. – Т.2. – 2013. – С. 98-99.

---

КОЛЕГОВ Антон Валерьевич

## **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО ХИМКОНТРОЛЯ БАРАБАНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ КОТЛОВ НА ОСНОВЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ И pH**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать 23.04.2013. Формат 60X84 1/16.

Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № 123.  
ФГБОУ ВПО «Ивановский государственный энергетический университет  
имени В.И. Ленина»

153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34.

Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ